

MEMORIA TESIS DOCTORAL



ESTUDIO SOBRE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS DE MARTE

María Ramírez Nicolás

**Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I
(Geofísica y Meteorología)**

**Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Complutense de Madrid**

**ESTUDIO SOBRE LOS CAMPOS
ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS DE MARTE**

**STUDY ON ELECTRICAL AND MAGNETIC
FIELDS ON MARS**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR CON
LA MENCIÓN DE DOCTORADO EUROPEO
PRESENTADA POR

María Ramírez Nicolás

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I

(Geofísica y Meteorología), Facultad de Ciencias Físicas



**ESTUDIO SOBRE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS
Y MAGNÉTICOS DE MARTE**

STUDY ON ELECTRICAL AND MAGNETIC FIELDS ON MARS

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR CON LA MENCIÓN DE
DOCTORADO EUROPEO PRESENTADA POR

María Ramírez Nicolás

Bajo la dirección de los Doctores

Luis Vázquez Martínez

(Universidad Complutense de Madrid)

Miguel Herraiz Sarachaga

(Universidad Complutense de Madrid)

Madrid, 2015

Esta Tesis Doctoral se ha elaborado en el marco del proyecto “Participación Científica en la misión a Marte Meiga MetNet Precursor”, y ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad: con los proyectos AYA2009-29967-C05-02, AYA2011-29967-C05-02, así como por una beca predoctoral (FPI) para la Formación del Personal Investigador (BES_2010_036602).

Durante la misma se han realizado varias estancias en centros de investigación internacionales, fundamentalmente en:

- ∞ Finnish Meteorological Institute (FMI), Helsinki, Finlandia (15 de febrero-17 de mayo de 2012).
- ∞ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS), Paris, Francia (18 de junio-18 de octubre de 2013).

This Thesis was developed in the framework of the “Participación Científica en la misión a Marte Meiga MetNet Precursor” Project, and has been funded by the Ministerio de Economía y Competitividad: with the projects AYA2009-29967-C05-02, AYA2011-29967-C05-02, and by a Predoctoral Research Fellowship (FPI) for the research staff training (BES_2010_036602).

During this PhD the candidate has been made several stays at international scientific research centers, mainly at:

- ∞ Finnish Meteorological Institute (FMI), Helsinki, Finland (February 15th-May 17th of 2012).
- ∞ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS), Paris, France (June 18th-October 18th of 2013).

AGRADECIMIENTOS

LANZAMIENTO

Esta Tesis Doctoral nace como parte de una gran misión en 2010. Esta aventura no se podría haber llevado a cabo sin la ayuda de mis dos Directores, **Luis Vázquez Martínez** y **Miguel Herraiz Sarachaga**.

Muchas gracias Luis, por todas las horas de dedicación, esfuerzo, entrega, ánimo, apoyo...que me has brindado a lo largo de todos estos años. Gracias por haber confiado en mí y por enseñarme que las cosas difíciles son las más gratificantes, que no hay puertas cerradas, sino bloqueadas, que la técnica del “agotamiento” siempre funciona, y que lo mejor para seguir hacia adelante es ser cuáquero y no rendirse. Como el nombre de la princesa china...”Si Yu Sun”
Gracias Michel por haberme dado la oportunidad, el conocimiento y los medios necesarios para poder enfrentarme a este reto y salir de él cargada de experiencias y vivencias que me han ayudado a crecer y madurar como persona.

I would also like to thank specially **Olivier Witasse** for his advices, support and understanding. For having the right word at all times and for be always ready to solve any scientific idea.

También quisiera agradecer al Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), la buena acogida que me brindaron así como cada una de las experiencias que he podido compartir con mis compañeros aquí. Al Departamento de Matemática Aplicada de la Facultad de Matemáticas de la UCM así como al Instituto de Matemática Interdisciplinar por las continuas facilidades que me han brindado.

Un agradecimiento cariñoso a **Sandro Radicella** por su continua disponibilidad para ofrecer un consejo, una buena palabra inquietud científica. Sin olvidar, por supuesto, las constantes muestras de afecto recibidas tanto en Trieste como en las visitas a Madrid.

The MARSIS ionograms have been processed with the MAISDAT tool jointly developed by IRAP laboratory (Toulouse, France) and ESA/ESTEC (Noordwijk, The Netherlands).

Also, I would like to thank the University of Leicester and specifically to Beatriz Sánchez-Cano for the manually procesing of the final topside density profiles.

TRAVESÍA

El inicio del viaje lo marcaron sin duda las ganas e ilusiones del equipo de Meiga-MetNet de la UCM, [Luis Vázquez](#), [Miguel Herraiz](#), [Beatriz Sánchez-Cano](#), [David Usero](#), [Gracia Rodríguez](#), [Pilar Romero](#), [Gonzalo Barderas](#), [Paco Valero](#), [Álvaro de Vicente](#), [Germán Martínez](#), [María Luisa Martín](#), [Antonio Manzano](#), y otros como si lo fueran, [Salvador Jiménez](#), [Carlos Aguirre](#), y [Mapi Velasco](#). Otros, me han hecho llegar sus ánimos, ganas y empuje desde el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) como [Héctor Guerrero](#) y [Lola Sabau](#), así como por todos los miembros del mismo. En especial, gracias a [Marina Díaz de Michelena](#) y a [Miguel Felipe Cerdán](#), por involucrarme y permitirme la participación en retos magnéticos impensables para mí.

There have been many stops made along this journey over the years, of which I keep special affection. I can never forget the great welcome and the warmth with which I was treated at the Finnish Meteorological Institute (FMI) during my first stay, especially [Ari Matti](#), [Esa Kallio](#) and [Riku Järvinen](#). Helsinki had not been the same for me without [Osku Kemppinen](#), who taught me how to live in the city, follow their customs and enjoy it all.

Paris was my second stop. City that grabs you, and people who welcome you with open hands. [Frank Montmessin](#), [Loïc Rossi](#) and [Anni Määttänen](#), thanks for the wise advices and exciting work in which we engage! Thanks for teas and sushi meals! I will never forget it.

ATERRIZAJE

Después de todos estos años, lo mejor de toda esta aventura ha sido darme cuenta de la cantidad de gente increíble que ha estado a mi lado y de la que he aprendido muchas cosas. Gracias a **Lucía Prieto** (y a los dos pequeñajos, **Antonio** y **Carlos**) por haber estado siempre a mi lado, en los días buenos y en los malos, y por tener siempre una mano preparada para ayudarme. Sé que no me llevo a una compañera, sino a una amiga. A **Salvador Crespillo** le quiero agradecer su infinita paciencia y su buena disponibilidad sin condición para solucionar cualquier problema.

No me puedo olvidar de las dos personas que me dieron la oportunidad de iniciar mi andadura científica y que seguramente sin ellos hoy no estaría aquí. **Elisa Buforn** quien a pesar del paso del tiempo siempre ha tenido una palabra o un gesto cariñoso hacia mí. No olvidaré jamás todo lo que aprendí de sismología (mi pasión oculta). Y por su puesto a mi italiano favorito, **Maurizio Mattesini**. Ti ringrazio molto per la tua amicizia durante questi anni. Beh, sai che non sei stato solo il mio capo, ma un compagno di lavoro ed amico ideale. Sono stata fortunata ad averti al mio fianco, hai sempre avuto la parola giusta ed il giusto consiglio da darmi per farmi sentire a mio agio. Grazie

Después de cinco años, al echar la mirada atrás me emociona pensar la cantidad de anécdotas, vivencias, experiencias, viajes, congresos, alegrías, tristezas que he compartido con gente tan maravillosa que siempre formarán parte de mí. Ha sido increíble compartir clase, departamento, cenas, viajes, aquelarres y bodas con mis “brujitas” **Diana Núñez** y **Ana García**, sin vosotras nada de ésto hubiera sido igual. Todas mis chicas del departamento, gracias por haber estado ahí, por hacer que los días pasaran de una forma irrepetible, **Izarra Rodríguez**, **Marta Rodríguez**, **Marta Carranza**, **Yasmina Martos**, **Tamara Abajo**. No va ser fácil superar todo lo que hemos vivido juntas. Si me acuerdo de viajes y congresos sólo me vienen a la cabeza dos personas **Beatriz Sánchez-Cano** y **Marina Sánchez-Bayton**. Todavía puedo reproducir con todo detalle cada una de las experiencias que hemos vivido. De la mayoría de ellas no puedo parar de reír, y eso sólo puede significar una cosa. Muchas gracias por haber sido un apoyo y por

vuestras sonrisas constantes, han sido un balón de oxígeno de gran valor. Bea, sigo pensando lo mismo, $tú+yo=\sin^2(\alpha)+\cos^2(\alpha)$.

Mi único lamento... mi gran descubrimiento, **Marta Martín**. Lástima que sólo coincidiéramos unos meses!! Te imaginas si hubiéramos tenido años...jejejeje. Nunca te podré agradecer lo suficiente tus constantes muestras de cariño. Confío tener tu amistad cerca por mucho tiempo más.

Tampoco me puedo olvidar de mis chicos, **Mariano Sastre**, **Rubén Carrillo** y **David González**. Cada uno habéis conseguido sacar una sonrisa de mí incluso en los momentos más difíciles, y eso se agradece.

Mi rinconcito especial para **Cristina García**, **Víctor Bautista**, **Alex Parilla**, **Laura Pacheco**, y mis peques **Víctor** y **Martina**. Bien sabéis que parte de esta Tesis es vuestra. Habéis hecho que me de cuenta de lo importante que sois para mí. Ha sido un camino largo con muchas idas y venidas, sin embargo, no hay cosa que me haga más ilusión que comprobar que a pesar de las aventuras que nos plantea la vida seguimos justas pase lo que pase, gracias **María José Bennasar**, y **Elisa Sanz**.

A pesar de que se ha terminado, me ilusiona la posibilidad de plantearme nuevas metas, seguir en contacto con la gente de siempre y con la nueva. Quería agradecerle a **Raquel Caro** la paciencia que ha tenido conmigo en la recta final de mi Tesis. A partir de ahora los límites los tenemos en la imaginación para seguir adelante con nuestro trabajo!

MISIÓN

El éxito de esta misión sólo puede entenderse gracias a mi familia **Ramírez-Nicolás**. Somos muchos...pero he sentido muy cerca todo vuestro cariño, empuje y apoyo incondicional. A todos los que habéis estado tan cerca de mí en esta montaña rusa. Muchas gracias a mis abuelos, tíos, primos, primos “segundos” a los que quiero como “primeros”...

A mi **Padre**, mi **Madre**, y a mis hermanas **Belén** y **Marta**. Nunca os cansáis de ayudarme y alentarme. Gracias por todos vuestros esfuerzos y por haber estado tan cerca de mí en esta etapa de mi vida. No habría llegado a ser la persona que soy hoy sin vosotros. A mis cuñados, **Juan** y **Guille**, sin vosotros no hubiera sido lo mismo.

A **Mariano**, **M^a Antonia**, **Sandra** y **Christian**. Nunca me hubiera imaginado recibir tanto apoyo y cariño. Muchas gracias por estar ahí.

A mi marido, **Sergio**. Una vez me dijeron que las cosas siempre pasan por algún motivo, y cada día estoy más convencida de ello. Si no fuera por todo lo que he vivido, no hubiera llegado nunca a ti. Eres mi mayor apoyo, y sabes cómo hacer especial cada uno de mis días. Este trabajo lo he logrado gracias a ti, a tu paciencia, compromiso, y a tu ayuda para levantarme cada vez que he caído. Gracias por hacerme entender que siempre estarás ahí. Te quiero.

A Sergio
A “Los Cinco”

Todos los problemas tienen solución,
y si no la tienen, no son un problema.

Anónimo

“**R**ecuerda siempre que eres más valiente de lo que crees,
más fuerte de lo que aparentas y más listo de lo que piensas”.

Christopher Robin

TABLA DE CONTENIDOS

- Lista de figuras y tablas V
- Glosario..... XV
- Terminología..... XVII
- Resumen / Summary.....XIX
- Motivación y objetivos / Motivation and aims XXIX
- CAPÍTULO 1: Marte..... 1
 - 1.1. Historia de la exploración 3
 - 1.2. Descripción general 5
 - 1.3. Conocimientos previos 9
 - 1.3.1. Partículas cargadas eléctricamente..... 10
 - 1.3.2. Polvo marciano 11
 - 1.3.3. Campos magnéticos y eléctricos 13
 - 1.3.4. Ionosfera marciana 16
- CAPÍTULO 2: Campo magnético de Marte 19
 - 2.1. Campo magnético marciano 22
 - 2.2. Medidas de Campo Magnético 24
 - 2.2.1. Medidas directas..... 24
 - 2.2.2. Medidas indirectas: datos Mars Express 27
 - 2.3. Modelos..... 31
 - 2.3.1. Modelos basados en fuentes equivalentes..... 31
 - 2.3.2. Modelos basados en armónicos esféricos..... 34
- CAPÍTULO 3: Campo eléctrico de Marte 37
 - 3.1. Polvo atmosférico marciano 40
 - 3.1.1. Polvo..... 40
 - 3.1.2. *Dust devils* y tormentas de polvo..... 42
 - 3.1.3. Procesos de electrización..... 43
 - 3.2. Modelos..... 46
- CAPÍTULO 4: Resultados I. Trayectorias de las partículas cargadas..... 51
 - 4.1. Descripción general 53
 - 4.1.1. Introducción y estudios previos 53

4.2.	Revisión de la teoría de Störmer.....	54
4.2.1.	Relación entre ambas aproximaciones	59
4.3.	Esquemas Numéricos	61
4.3.1.	Coordenadas Cilíndricas	61
4.3.2.	Coordenadas Cartesianas	64
4.4.	Resultados Numéricos	70
4.4.1.	Ajuste preliminar de parámetros	70
4.4.2.	Condiciones iniciales realistas.....	77
4.5.	Momento Angular	80
4.6.	Discusión I.....	87
CAPÍTULO 5: Resultados II. Análisis del campo magnético		91
5.1.	Descripción general, estudios previos.....	93
5.2.	Campo magnético a partir de los datos de MARSIS.....	95
5.2.1.	Datos del radar MARSIS	95
5.2.2.	Procesado de los datos	98
5.3.	Metodología: cálculo de la altura de escala, H_p , la altura de transición, A_T y la temperatura, T_p	104
5.3.1.	Estimación de la altura de escala del plasma.....	104
5.3.2.	Estimación de la altura de transición para el campo magnético inducido.....	106
5.3.3.	Balance de presiones: Valores de campo magnético.....	107
5.3.4.	Balance de Presiones: Estimación de la temperatura	108
5.4.	Resultados.....	109
5.4.1.	Comparativa órbita 3151 y 9316	110
5.4.2.	Caso especial órbita 6788.....	121
5.5.	Discusión II	126
CAPÍTULO 6: Resultados III. Análisis del campo eléctrico		129
6.1.	Descripción general	131
6.2.	Campo eléctrico.....	133
6.2.1.	Runge-Kutta	133
6.2.2.	Esquema numérico propuesto.....	136
6.3.	Presentación de los resultados	138
6.3.1.	Validación del esquema numérico	139
6.3.2.	Comparación entre el campo eléctrico marciano y terrestre.....	141

6.3.3. Influencia de los parámetros	143
6.4. Datos campo eléctrico	151
6.5. Discusión III.....	151
CAPÍTULO 7: Conclusiones / Conclusions	155
CAPÍTULO 8: Trabajo futuro / Future work lines.....	165
CAPÍTULO 9: Referencias	171
ANEXO I. Misiones a Marte.....	193
ANEXO II. Método Runge-Kutta	195
ANEXO III. Parámetros característicos órbitas: 9316, 3151 y 6788.	201
ANEXO IV. Perfiles densidad electrónica, 3151	211
ANEXO V. Perfiles densidad electrónica, 9316.....	213
ANEXO VI. Perfiles densidad electrónica, 6788	215
ANEXO VII. Órbita 3151: Valores calculados	217
ANEXO VIII. Órbita 9316: Valores calculados.....	219
ANEXO IX. Órbita 6788: Valores calculados.....	221
ANEXO X. Contribuciones científicas.....	223

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

- Figura 1-1.** Imagen en falso color de la topografía de Marte a partir de los datos del instrumento MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) a bordo de la misión Mars Global Surveyor (MGS). La escala de colores indica en km las diferencias en altura, siendo los colores más oscuros los de mayor profundidad, mientras que los más claros corresponden a los de mayor altura. (<http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA02820>).... **8**
- Figura 1-2.** Imágenes tomadas por el telescopio espacial Hubble. La imagen de la izquierda corresponde al 26 de Junio de 2001, mientras que la de la derecha fue tomada el 4 de Septiembre de 2001. (NASA, J. Bell (Cornell), M. Wolff (SSI), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)). **12**
- Figura 1-3.** Fotografía tomada por el rover Spirit en el Sol 486, que corresponde con el día 486 del año marciano. (http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/2005_dust_devil.html).**13**
- Figura 1-4.** Ilustración de la componente radial de las anomalías magnéticas corticales basada en los datos del instrumento MAG/ER a bordo de la misión Mars Global Surveyor (Connerney et al., 2005). **14**
- Figura 2-1.** Ilustración comparativa de las magnetosferas de la Tierra (coloreada en azul) y de Marte (coloreada en rojo) en su interacción con el Sol. **22**
- Figura 2-2.** Izquierda, ilustración de los vectores de campo magnético tomados en Marte (vista desde el Sol) por la misión MGS en el día 264. Derecha, proyecciones ortográficas de las tres componentes del campo magnético (B_r , B_θ , B_ϕ) a una altura nominal de 400 km (Connerney et al., 2001). **25**
- Figura 2-3.** Mapa de campo magnético suavizado a partir de datos de ER en proyección cilíndrica. La escala de colores corresponde con los valores de campo magnético cortical en escala logarítmica a una altura de 185 km. Dichos valores se encuentran superpuestos a un mapa de topografía MOLA (Smith et al., 2001) en escala de grises. **26**
- Figura 2-4.** Ionograma 156 de la órbita 3151 de la misión MEX, en la parte nocturna de Marte. Registrado el 23-06-2006 a las 23:40:32.623 (SZA= 46.65 °, z= 310 km). **28**
- Figura 2-5.** A la izquierda, esquema de los ecos horizontales identificable en un ionograma, debidos al movimiento ciclotrónico de los electrones. A la derecha se representa el mecanismo de generación del movimiento ciclotrónico de los electrones. Los pulsos de alta intensidad emitidos por la antena del instrumento MARSIS permiten la aceleración de los electrones que se encuentran en su entorno más próximo. De este modo los electrones, que estaban en fase de escape de la antena se sienten atraídos de nuevo hacia la misma describiendo un movimiento ciclotrónico. **29**
- Figura 2-6.** Recreaciones de las componentes características del campo magnético para una esfera (izquierda) y para un cilindro (derecha), que se encuentran a una cierta profundidad, d, de la superficie. En azul se

muestra la componente x, y en rojo la componente z de la intensidad de campo magnético.....	33
Figura 2-7. Componentes del campo magnético generado por una placa delgada. En azul se muestra la componente x, y en rojo la componente z de la intensidad de campo magnético.	33
Figura 3-1. Visión esquematizada de los diferentes procesos transporte por los que las partículas de polvo y arena se ven afectados.....	41
Figura 3-2. Esquema de los dos principales procesos de intercambio de carga que ocurren mediante procesos triboeléctricos (fricción) entre el polvo y la arena con la superficie y entre las propias partículas (polvo-arena, polvo-polvo ó arena-arena).	44
Figura 3-3. Visión esquematizada del proceso de intercambio de cargas que ocurre en el interior de un <i>dust devil</i> así como del campo eléctrico derivado de la separación de cargas.	45
Figura 4-1. Pozos de potencial calculados a partir de la teoría de Störmer descrita para un electrón (izquierda) y un protón (derecha) utilizando la ecuación adimensional (4.4).	56
Figura 4-2. Pozos de potencial para un electrón (izquierda) y un protón (derecha) en unidades Gaussianas calculados a partir de la ecuación (4.5).	58
Figura 4-3. Trayectorias atrapadas descritas por un electrón (izquierda) y un protón (derecha) en el plano z- ρ a partir de las expresiones (4.5) y (4.6). ..	63
Figura 4-4. La figura de la izquierda corresponde con las trayectorias analítica (línea roja) y numérica (línea azul) de un electrón bajo las condiciones descritas. Los tres paneles de la figura de la derecha muestran los errores entre ambas soluciones, módulo de la solución real (MSR), módulo de la solución numérica (MSN) así como el porcentaje del error definido como $(MSN-MSR)/(MSR)100$	67
Figura 4-5. Trayectorias en el plano (r, z) descritas por un electrón en movimiento bajo la acción de un campo magnético generado por una esfera magnetizada. Izquierda, trayectoria a partir del esquema numérico descrito por las ecuaciones (4.18), (4.19). Derecha, trayectoria obtenida a partir del esquema numérico propuesto, ecuación (4.21).	72
Figura 4-6. Trayectorias atrapadas (paneles superiores) y no atrapadas (paneles inferiores) descritas por un electrón bajo la acción de diferentes fuentes magnetizadas: esfera (izquierda), cilindro (centro) y la combinación lineal de ambas (derecha). De arriba abajo, y de izquierda a derecha cada fila de figuras corresponden con las trayectorias atrapadas y no atrapadas respectivamente: electrón-esfera (TES-UES), electrón-cilindro (TEC-UEC) y electrón-esfera+cilindro (TESC-UESC).	74
Figura 4-7. Igual que en la Figura 4-6 considerando el movimiento de un protón. De arriba abajo, y de izquierda a derecha cada fila de figuras corresponden con las trayectorias atrapadas y no atrapadas respectivamente: protón-esfera (TPS-UPS), protón-cilindro (TPC-UPC) y protón-esfera+cilindro (TPSC-UPSC).	75

- Figura 4-8.** Igual que en la Figura 4-6 considerando el movimiento de una partícula alfa. De arriba abajo, y de izquierda a derecha cada fila de figuras corresponden con las trayectorias atrapadas y no atrapadas respectivamente: protón-esfera (TAS-UAS), protón-cilindro (TAC-UAC) y protón-esfera+cilindro (TASC-UASC)..... **75**
- Figura 4-9.** Trayectoria confinada descrita por un electrón en movimiento con velocidades del orden de km/s, obtenida a partir del esquema numérico propuesto en coordenadas Cartesianas. **78**
- Figura 4-10.** Trayectorias confinadas de un electrón para diferentes configuraciones (paneles superiores). En azul, aparecen las trayectorias sin considerar el efecto de la gravedad, mientras que las descritas en rojo sí lo hacen. Los paneles inferiores corresponden a las diferencias que existen entre ambas trayectorias, $\Delta Error$ **80**
- Figura 4-11.** El panel de la izquierda, corresponde a la trayectoria descrita por un electrón en coordenadas Cartesianas obtenidas a partir de la solución numérica (4.21, 4.26) en negro, mientras que en rojo se representa la solución analítica (4.51). Los dos paneles de la derecha comparan las soluciones numéricas (negro) y analíticas (rojo) de las componentes x (arriba) e y (abajo) de la velocidad de la partícula. **85**
- Figura 4-12.** La figura de la izquierda representa la trayectoria del electrón en coordenadas Cartesianas en unidades Gaussianas. A la derecha, la trayectoria correspondiente representada en el plano (ρ, z) **86**
- Figura 4-13.** Comparación del momento angular en unidades del SI. A la izquierda, las tres componentes del momento angular obtenidas a partir de los términos de la derecha de las ecuaciones (4.45), (4.46) y (4.48). A la derecha se muestran las tres componentes del momento angular, L_x (rosa), L_y (azul) y L_z (verde), de un electrón en movimiento bajo la acción de un campo magnético dipolar. **86**
- Figura 5-1.** Datos obtenidos de la misión PVO (Pioneer Venus Orbiter) para tres órbitas diferentes (Figura 12 de Russell et al. 1992). En cada uno de los tres paneles, la línea continua (escala inferior) representa la intensidad medida del campo magnético, mientras que los puntos corresponden a los perfiles de densidad electrónica (escala superior)..... **94**
- Figura 5-2.** Comparación de los valores de campo magnético de la órbita 2018 de la misión MEX. La línea continua, corresponde con los valores de campo magnético calculados a partir del modelo de Cain et al. (2003), la discontinua son los valores de B_{MEX} , mientras que los puntos, corresponden con los valores obtenidos por Gurnett et al. (2008). **97**
- Figura 5-3.** Mapa de la superficie marciana. Las regiones sombreadas, desde el azul oscuro hasta el granate, corresponden con las anomalías magnéticas (nT) obtenidas a partir de JMARS (Java Mission-planning and Analysis for Remote Sensing). Las trazas en color rojo corresponden con las órbitas descritas por MEX..... **98**

- Figura 5-4.** Espectrogramas obtenidos a partir de MARSIS para las tres órbitas seleccionadas: el panel A corresponde a la órbita 9316 (sin campo magnético inducido), el panel B a la órbita 3151 (con presencia de campo magnético inducido) y el panel C la órbita 6788 (con presencia de campo magnético inducido y campo magnético en la superficie). **100**
- Figura 5-5.** Panel superior, ejemplo de dos ionogramas característicos de las órbitas 9316 (izquierda) y 3151 (derecha) de la misión MEX. Ambos casos corresponden con el pericentro de las órbitas. Los ecos horizontales que se aprecian en la figura de la derecha están producidos por la presencia de un campo magnético a la altura de la nave. El panel inferior corresponden con los perfiles de densidad electrónica asociados a los ionogramas anteriores. **101**
- Figura 5-6.** Series de las principales características para las órbitas 9316 y 3151 de la misión MEX. De arriba a abajo los paneles corresponden a: densidad electrónica local y en el pico, altura del pico y de la nave, valor del campo magnético obtenido por MARSIS y valor del contenido total de electrones. **102**
- Figura 5-7.** Distribución de densidad electrónica normalizada para las órbitas 3151 y 9316. En rosa se muestran los resultados correspondientes a los perfiles 169, 186 y 177 (órbita 3151), mientras que en azul aparecen los resultantes del perfil 206 (órbita 9316). La línea negra muestra el comportamiento del perfil de densidad normalizado para un valor de altura de escala del plasma constante. **112**
- Figura 5-8.** Valores de la altura de escala del plasma calculados para la zona controlada fotoquímicamente de la ionosfera en función de la latitud. Los valores para la órbita 9316 aparecen en negro, mientras que en rosa se han representado los correspondientes a la órbita 3151. **113**
- Figura 5-9.** Perfil de densidad electrónica número 169 de la órbita 3151 de Mars Express. Los puntos rosas pertenecen al la región de la ionosfera controlada por procesos fotoquímicos. Los cuadrados azules son los puntos de densidad electrónica que corresponden con la región en la ionosfera regida por procesos de transporte y campo magnético. Por último, los círculos blancos representan la región de la ionosfera controlada por procesos de transporte sin influencia del campo magnético. **114**
- Figura 5-10.** Valores de las alturas de escala identificadas para algunos perfiles de la órbita 3151 en función del ángulo cenital solar. Los cuadrados rosas corresponden a la altura de escala calculada para la parte más próxima al máximo de densidad electrónica (fotoquímica), mientras que los blancos corresponden a una ionosfera bajo la acción de un campo magnético inducido. **115**
- Figura 5-11.** Comparación de los valores de campo magnético para la órbita 3151. En rosa, los valores obtenidos a partir de los datos de MARSIS, mientras que en negro se muestran los valores obtenidos a partir del balance de presiones. **116**

- Figura 5-12.** Distribución de los valores de campo magnético a la altura de transición, obtenidos a partir del balance de presiones para la órbita 3151, en función del ángulo cenital solar. Círculos (15-25 nT), triángulos (25-35 nT) y cuadrados (>35 nT)..... **117**
- Figura 5-13.** Comparación con un modelo numérico de ionosfera marciana. Los tres paneles corresponden a los datos del perfil número 169 de la órbita 3151. El panel superior corresponde al perfil de densidad electrónica, donde las estrellas son los datos proporcionados por MARSIS y la línea el modelo. En el segundo panel se han representado los valores de la temperatura del plasma del modelo, línea negra. La flecha vertical naranja indica el rango sobre el que se ha calculado la altura de escala. El último panel muestra un perfil de intensidad de campo magnético, calculado con el modelo, y los valores del mismo a la altura de transición en círculos rosas. **120**
- Figura 5-14.** Series respecto al ángulo cenital solar de las principales características de la órbita 6788. De arriba a abajo los paneles corresponden a: densidad electrónica a la altura de la nave y en el pico, altura del máximo de densidad electrónica y de la nave, valor del campo magnético obtenido por MARSIS y valor del contenido total de electrones. **121**
- Figura 5-15.** Comparativa de los dos perfiles característicos de la órbitas 6788. A la izquierda, el perfil de densidad electrónica número 177 y a la derecha, el perfil de densidad electrónica número 184. Las alturas de escala identificadas: en rosa la correspondiente a la región fotoquímica y en azul el resultado del efecto del campo magnético sobre la ionosfera. **123**
- Figura 5-16.** Distribución del campo magnético a la altura de transición, obtenido a partir del balance de presiones, para la órbita 6788 en función del ángulo cenital solar. La escala de colores del azul al rojo indica la intensidad del campo magnético de forma creciente en nT. Círculos (15-25) nT, triángulos (25-35) nT y cuadrados (>35) nT..... **124**
- Figura 5-17.** Comparativa de los valores del campo magnético en función del ángulo cenital solar. En amarillo el campo magnético deducido a partir de MARSIS, en naranja los valores obtenidos a partir del modelo de Cain et al. (2003) y en negro los deducidos a partir del balance de presiones..... **125**
- Figura 6-1.** Dos imágenes reales obtenidas por la cámara de alta resolución, PanCam (Panoramic Camera System), a bordo de la misión Spirit, (www.pancam.astro.cornell.edu)..... **132**
- Figura 6-2.** Imagen de un *dust devil* captado el 14 de marzo de 2012 por la Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). NASA/JPL-Caltech/UA. **132**
- Figura 6-3.** Evolución de las velocidades de los granos grandes (línea roja), granos pequeños (línea azul) y la diferencia entre las velocidades (línea negra)..... **134**
- Figura 6-4.** Evolución temporal del campo eléctrico obtenido al utilizar el método de Runge-Kutta en la ecuación (6.1), considerando únicamente las

- fuerzas asociadas a las variaciones temporales en la carga para diferencias de velocidades entre los granos pequeños y grandes constantes..... **135**
- Figura 6-5.** Evolución temporal del campo eléctrico en el interior de un *dust devil*. Las líneas discontinuas muestran las soluciones obtenidas a partir del método Runge-Kutta, mientras que las líneas continuas corresponden con las soluciones obtenidas a partir del esquema numérico propuesto. En azul, se muestra la solución del caso 1, en verde la correspondiente al caso 2 y en rojo el caso 3. **139**
- Figura 6-6.** Evolución del campo eléctrico obtenido a partir del esquema numérico propuesto para resolver la ecuación (6.1). En líneas discontinuas se muestran las soluciones para $r_L=30\ \mu\text{m}$, y las continuas para $r_L=20\ \mu\text{m}$. En azul, verde y rojo se identifican las soluciones del caso 1, caso 2 y caso 3 respectivamente. **140**
- Figura 6-7.** Evolución del campo eléctrico obtenido a partir del caso . La línea continua y la discontinua corresponden con los casos de Marte y de la Tierra respectivamente..... **142**
- Figura 6-8.** Valores de campo eléctrico bajo condiciones iniciales diferentes. Panel A: $r_L\ (\mu\text{m})= 10$ (amarillo), 20 (rosa), 30 (verde) y 50 (azul); Panel B: $r_s\ (\mu\text{m})= 0.5$ (amarillo), 1 (rosa), 5 (verde); Panel C: $n_L\ (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})= 10$ (amarillo), 5 (rosa), 10 (verde), 15 (azul) y 30 (rojo); Panel D: $n_s\ (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})= 10$ (amarillo), 30 (rosa), 50 (verde), 70 (azul) y 100 (rojo)..... **144**
- Figura 6-9.** Evolución del campo eléctrico con el tiempo para diferentes valores de r_s , cuando tiende a alcanzar el valor de r_L . Panel A: $r_s= 1$ (amarillo), 2 (rosa), 3 (verde), 4 (azul) y 5 (rojo); Panel B: $r_s= 7$ (amarillo), 9 (rosa), 10 (verde), 15 (azul) y 17 (rojo); Panel C: $r_s= 19.0$ (amarillo), 19.5 (rosa), 19.7 (verde), 19.8 (azul) y 19.9 (rojo)..... **147**
- Figura 6-10.** Valores de campo eléctrico calculados para valores de r_s cuando se aproximan a r_L . En rosa, se muestran los valores obtenidos a los 10 s, en azul a los 20 s y en negro a los 30 s. La línea roja muestra el valor del radio de los granos grandes..... **149**
- Figura 6-11.** Evolución del campo eléctrico para diferentes valores del viento. $W\ (\text{m/s})= 4$ (amarillo), 10 (rosa), 25 (verde), 50 (azul), 100 (roja)..... **150**
- Figura AIV- 1.** Perfiles de densidad electrónica. Régimen 1: perfiles #125 al #141. **211**
- Figura AIV- 2.** Perfiles de densidad electrónica. Régimen 2: perfiles #144 al #152. **211**
- Figura AIV- 3.** Perfiles de densidad electrónica. Régimen 3: perfiles #1563 al #173. **212**
- Figura AIV- 4.** Perfiles de densidad electrónica. Régimen 4: perfiles #174 al #177. **212**
- Figura AIV- 5.** Perfiles de densidad electrónica. Régimen 5: perfiles #179 al #192. **212**

Figura AV- 1. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 1: perfiles #153 al #156.	213
Figura AV- 2. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 2: perfiles #159 al #178.	213
Figura AV- 3. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 3: perfiles #179 al #183.	214
Figura AV- 4. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 4: perfiles #184 al #194.	214
Figura AVI- 1. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 1: perfiles #160 al #170.	215
Figura AVI- 2. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 2: perfiles #172 al #179.	215
Figura AVI- 3. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 3: perfiles #181 al #190.	216
Figura AVI- 4. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 4: perfiles #191 al #194.	216
Tabla 1-1. Resumen de las misiones a Marte que se han llevado a cabo desde 2000 hasta la actualidad.	4
Tabla 1-2. Constituyentes atmosféricos de la Tierra y Martes expresados en tanto por ciento en peso.	5
Tabla 2-1. Resumen de las principales características de los campos magnéticos correspondientes a los planetas del sistema Solar.	21
Tabla 4-1. Resumen de los valores constantes en unidades Gaussianas (NOTA: $1\text{esu}=1\text{statC}=1\text{g}^{1/2}\text{cm}^{3/2}\text{s}^{-1}$).	57
Tabla 4-2. Valores máximos y mínimos obtenidos en la Figura 4-1 y en la Figura 4-2 correspondientes a los potenciales calculados para un electrón y un protón a partir de la ecuación (4.4, 4.5). Todos los resultados se presentan en unidades Gaussianas.	59
Tabla 4-3. Resumen de las condiciones iniciales adimensionales para el esquema numérico r/z (4.18 y 4.19) para un electrón y un protón.	64
Tabla 4-4. Resumen de los valores constantes utilizados para resolver el esquema numérico en unidades Gaussianas (NOTA: $1\text{esu}=1\text{statC}=1\text{g}^{1/2}\text{cm}^{3/2}\text{s}^{-1}$).	71
Tabla 4-5. Resumen de los valores correspondientes a los parámetros adimensionales que permiten resolver las ecuaciones (18) y (19) en coordenadas Cilíndricas.	72
Tabla 4-6. Resumen de los parámetros principales iniciales para resolver la ecuación (21) en unidades Gaussianas.	73
Tabla 4-7. Valores de las condiciones iniciales para la posición, r_0 , (en coordenadas Cartesianas) y el parámetro de discretización, h , para un electrón. Los valores se han descrito en unidades Gaussianas.	76

Tabla 4-8. Valores de las condiciones iniciales para la posición, r_0 , (en coordenadas Cartesianas) y el parámetro de discretización, h , para un protón. Los valores se han descrito en unidades Gaussianas.	76
Tabla 4-9. Valores de las condiciones iniciales para la posición, r_0 , (en coordenadas Cartesianas) y el parámetro de discretización, h , para una partícula alfa. Los valores se han descrito en unidades Gaussianas.	76
Tabla 4-10. Valores de energía cinética para una partícula cargada eléctricamente (electrón, protón y partícula alfa) bajo la acción de un campo magnético generado por una esfera uniformemente magnetizada.	77
Tabla 4-11. Resumen de las condiciones iniciales utilizadas para analizar el efecto de la gravedad en la trayectoria de un electrón bajo el campo generado por una esfera uniformemente imanada.	79
Tabla 5-1. Resumen de los parámetros más característicos de la órbita 2018 de la misión Mars Express.	97
Tabla 5-2. Principales características de las órbitas 9316, 3151 y 6788 de la misión MEX.	99
Tabla 5-3. Valores característicos correspondientes a la altura de escala del plasma para las órbitas 9316 y 3151.	115
Tabla 5-4. Valores característicos correspondientes a la altura de escala del plasma para las órbitas 9316, 3151 (en el mismo rango de latitudes) y 6788 (para toda la órbita).	124
Tabla 6-1. Valores utilizados para las partículas grandes y pequeñas correspondientes así como las condiciones atmosféricas marcianas.	133
Tabla 6-2. Valores complementarios a la Tabla 6-1 para el caso de la Tierra. .	142
Tabla 6-3. Resumen de los valores empleados en el estudio comparativo de la variación temporal del campo eléctrico en función de r_L , r_S , n_L , n_S y W , para las figuras Figura 6-6 y Figura 6-7.	145
Tabla AI- 1. Relación de las misiones a Marte llevadas a cabo por diferentes países entre los años 1960 y 2001.	193
Tabla AIII- 1. Información, de los parámetros representativos, relativa a la órbita 2018 de la misión Mars Express.	201
Tabla AIII- 2. Información obtenida a partir de los ionogramas del radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express para la órbita 9316.	205
Tabla AIII- 3. Información obtenida a partir de los ionogramas del radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express para la órbita 3151.	207
Tabla AIII- 4. Información obtenida a partir de los ionogramas del radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express para la órbita 6788.	209
Tabla AVII- 1. Valores calculados de campo magnético a la altura de la nave, altura de escala del plasma y altura de transición correspondientes a la órbita 3151.	217
Tabla AVIII- 1. Valores calculados de campo magnético a la altura de la nave, altura de escala del plasma y altura de transición correspondientes a la órbita 9316.	219

Tabla AIX- 1. Valores calculados de campo magnético a la altura de la nave, altura de escala del plasma y altura de transición correspondientes a la órbita 6788.....	221
--	------------

GLOSARIO

AIS	Active Ionospheric Sounding
DC	Corriente Continua
DS	Dust Sensor
ESA	European Space Agency
FMI	Finnish Meteorological Institute
IDL	Interactive Data Language
IKI	Russian Space Research Institute
INTA	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
IMF	Interplanetary Magnetic Field
JMARS	Java Mission lanning and Analysis for Remote Sensing
LA	Lavochkin Association
MAG-ER	Magnetometer-Reflectometer
MARSIS	Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding
Mathumi	Atmospheric Humidity Sensor
MAVEN	Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission
MetBaro	Atmospheric Pressure Sensor
MetNet	Meteorological Network
MetSIS	Sensor Espectral de Irradiancia Solar para MetNet
MEX	Mars Express
MGS	Mars Global Surveyor
MO	Mars Observer
MOLA	Mars Orbiter Laser Altimeter
MOURA	Magnetometer to determine mineral composition
MPB	Magnetic Pileup Boundary
MSL	Mars Sience Laboratory
PanCam	Panoramic Camera System
PEP	Photo-Electron Boundary
PVO	Pionner Venus Orbiter
SPICAM	Spectroscopy of Investigation of the Atmosphere of Mars
SWEA	Solar Wind Electron Analyzer
SWIA	Solar Wind Ion Analyzer
UCM	Universidad Complutense de Madrid

TERMINOLOGÍA

Aerobraking

Es una técnica de reducción de la velocidad relativa de una nave a través del uso controlado de la resistencia atmosférica. De esta forma se alcanza el punto más bajo de la órbita descrita (perigeo).

Dust Devil

Es un fenómeno meteorológico formado por una columna de aire en rotación orientada verticalmente. Es un torbellino bien definido de relativa larga duración y que en Marte tiene unas dimensiones que van desde los centenares de metros de ancho hasta las decenas de kilómetros de alto.

Lander

Es una nave espacial que desciende a través de la atmósfera de un planeta y se deposita en la superficie del mismo. Puede denominarse módulo de aterrizaje.

Rover

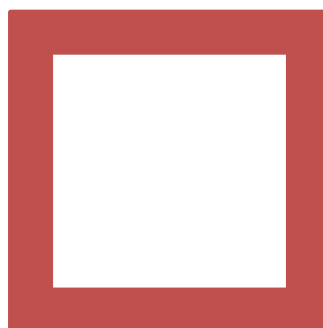
Es un vehículo de exploración espacial diseñado específicamente para moverse en la superficie de un planeta o cuerpo celeste. Alguno de los mismo han sido diseñados para transporte de los miembros de una tripulación de vuelos espaciales tripulados, sin embargo otros son robots parcial o totalmente autónomos de gran utilidad para la exploración espacial.

Saltation

Es un tipo específico de transporte de partículas, generalmente de polvo, a través de fluidos como el viento o líquidos más densos como el agua. Se produce cuando partículas de un material suelto sobre la superficie son alzados respecto de la superficie y transportados en el fluido antes de volver a la superficie.

Topside

Región de la atmósfera comprendida entre el máximo de densidad electrónica de la ionosfera y el límite superior de la misma.



RESUMEN



SUMMARY

Introducción

Gracias a las nuevas misiones a Marte el volumen de datos ha ido creciendo en los últimos 10 años, proporcionando información muy valiosa para el conocimiento del planeta. Los nuevos datos permiten a los investigadores generar nuevos modelos, metodologías y teorías acerca del origen, evolución y futuro del planeta.

Por otra parte, resultan igualmente importantes las investigaciones realizadas en paralelo sobre fenómenos que ocurren en la Tierra, y que tienen lugar básicamente bajo los mismos procesos en Marte y sirven tanto para explicar dichos fenómenos como para la calibración de los instrumentos para las nuevas misiones.

Objetivos

A lo largo de esta Tesis se ha trabajado fundamentalmente en tres objetivos:

1. Interacción de las partículas cargadas eléctricamente con campos magnéticos

- * Generación de un nuevo esquema numérico capaz de describir las trayectorias de las partículas en campos magnéticos genéricos.
- * Análisis de la evolución del momento angular de las partículas desde un punto de vista discreto y continuo.

2. Interacción del viento solar con la ionosfera marciana

- * Identificación del efecto de un campo magnético inducido sobre la ionosfera marciana a partir de la altura de escala del plasma, H_p , y de la altura de transición, AT.
- * Análisis del balance de presiones entre la ionosfera y el viento solar: Obtención de los valores de la intensidad del campo magnético y de la temperatura del plasma

3. Campos eléctricos obtenidos a partir de la interacción de partículas de polvo en una tormenta y, en particular, el interior de un *dust devil*

- * Obtención de un método nuevo para estimar la evolución temporal del campo eléctrico así como el valor de su ruptura, a partir del esquema numérico propuesto en esta Tesis.
- * Análisis de la influencia de los parámetros característicos de las partículas, así como de las condiciones del entorno.

Datos y Metodología

Para alcanzar el objetivo 2 se ha trabajado directamente con los datos proporcionados por el radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express. Dicho radar proporciona información en forma de ionogramas, sobre las principales características de la ionosfera marciana. A partir de los ionogramas se han obtenido los perfiles de densidad electrónica así como los valores del campo magnético a la altura de la nave. Con la información proporcionada por estos valores se han obtenido los valores de altura de escala para cada uno de los perfiles analizados, de cada una de las tres órbitas estudiadas. Así mismo, se han podido estimar los correspondientes valores de la altura de transición.

Los otros dos objetivos se centran fundamentalmente en estudios teóricos a partir de las simulaciones numéricas de:

- * La ecuación de movimiento de una partícula cargada influenciada por la acción de un campo magnético.
- * La ecuación de continuidad para el campo eléctrico generado en el interior de un *dust devil*.

Resultados

El trabajo desarrollado a lo largo de esta Tesis, ha permitido alcanzar un mayor conocimiento de tres aspectos fundamentales de los procesos observados en Marte.

En primer lugar, se ha desarrollado un esquema numérico capaz de determinar el estado de confinamiento de las partículas cargadas eléctricamente cuando se encuentran bajo la influencia de campos magnéticos. El esquema propuesto resulta válido tanto para campos magnéticos con simetría como para los casos generales del mismo.

En segundo lugar, se ha demostrado la influencia directa de la acción del campo magnético inducido sobre la ionosfera marciana. Por otro lado, se han determinado los valores de las alturas de escala del plasma característicos de cada órbita así como las alturas de transición, permitiendo establecer el límite de influencia de dicho campos magnéticos.

Por último, se presenta un método alternativo para el análisis de la evolución temporal del campo eléctrico generado en el interior de un *dust devil*, a partir de las colisiones que tienen lugar entre los granos de polvo. Se han

estudiados tres posibles discretizaciones de la ecuación de continuidad para el campo eléctrico, en función de las fuerzas que se han tenido en cuenta. Así mismo, se proporciona un estudio detallado de la influencia de los parámetros fundamentales del esquema en los resultados.

Conclusiones

El trabajo realizado a lo largo de esta Tesis Doctoral ha permitido alcanzar las siguientes conclusiones, a partir de los objetivos planteados al inicio de la misma.

Objetivo 1

Se ha propuesto un esquema numérico a partir del cual, se han estudiado las trayectorias para diferentes partículas bajo diferentes configuraciones de campos magnéticos obtenidos a partir de diferentes fuentes magnetizadas. El esquema, resulta una herramienta de gran interés ya que permite analizar cualquier tipo de partícula en cualquier tipo de campo magnético. A partir del esquema, se han reproducido trayectorias confinadas para tres tipos de partículas (electrón, protón y partícula alfa) bajo tres configuraciones de campo magnético en el entorno marciano. Las diferencias entre las trayectorias, se deben a las propiedades de cada partícula, así como por las condiciones iniciales de posición y velocidad para las mismas.

Objetivo 2

A partir de los datos del radar MARSIS, se ha confirmado la influencia del campo magnético inducido por influencia del viento solar en la ionosfera. Este resultado se ha obtenido a partir de los valores de la altura de escala del plasma (tanto para la región dominada por procesos fotoquímicos como en la que predominan los fenómenos de transporte) y la altura de transición. También se han calculado los valores de campo magnético a la altura de la nave, a lo largo de cada una de las órbitas estudiadas. Por otro lado del análisis del balance de presiones (ionosférica y viento solar) se han calculado con gran precisión los valores para la temperatura y el campo magnético del plasma.

Objetivo 3

Por último se ha formulado un método nuevo para la resolución de la ecuación de continuidad del campo eléctrico. A partir de la misma, se obtiene tanto la evolución temporal del campo eléctrico así como el potencial eléctrico de ruptura en el interior de un *dust devil* (en torno a los ~ 10 kV/m en el caso de Marte). Así mismo se establece la relevancia del tamaño y densidad de partículas en los valores obtenidos de campo eléctrico.

Este trabajo ha dado lugar a las siguientes publicaciones científicas:

Ramírez-Nicolás, M., Usero, D., and Vázquez, L. Numerical studies of charged particles in a magnetic field : Mars application, Cent. Eur. J. Phys 12, 521-531, 2014.

Ramírez-Nicolás, M., Usero, D., Velasco, M.P., and Vázquez, L. Numerical study of a charged particle in a general magnetic field, International Journal of Pure and Applied Mathematics (enviado), 2015.

Ramírez-Nicolás, M., Sánchez-Cano, B., Witasse, O., Blelly, P.-L., and Lester, M. The effect of the induced magnetic field on the electron density vertical profile of the Mars' ionosphere: a Mars Express MARSIS radar data analysis and interpretation, Planet Space Sci (en revisión), 2015.

Ramírez-Nicolás, M., Herraiz, M., Vázquez, L. Electric field analysis from a numerical scheme on Mars, (en preparación).

Introduction

Thanks to recent missions to Mars, data volume has grown over the last 10 years, providing valuable information for a better understanding of the planet. The new data allow researchers to generate new models, methodologies and theories about the origin, evolution and the future of the planet.

On the other hand, it is equally important research conducted in parallel on phenomena that occur on Earth, which occur basically under the same processes on Mars. All this research is very useful both to explain such phenomena as for the calibration of the instruments for new missions.

Aims

The work of this Thesis has been focused primarily on three objectives:

1. Interaction of charged particles with magnetic fields

- * To generate a new numerical scheme which allows to describe the particle trajectories in generic fields.
- * To analyze the angular momentum of the particles from a discrete and continuous point of view.

2. Solar wind interaction with the martian ionosphere

- * To identify of the effect of an induced magnetic field on the martian ionosphere from the plasma scale height, and the transition altitude.
- * To analyze the balance of pressures between the ionosphere and the solar wind: getting values of the intensity of the magnetic field and the plasma temperature.

3. Electric fields within a dust devil obtained from the interaction of dust particles

- * To get a new method to estimate the evolution of the electric field and the value of rupture from the numerical scheme proposed in this Thesis.
- * To analyse the influence of the characteristic parameters of the particles, as well as environmental conditions for the electric field values.

Data and Methodology

To achieve objective 2 data provided by the MARSIS radar on board the Mars Express misión have been used. This radar provides ionograms as information

the, which gives details of the main features of the martian ionosphere. The corresponding electron density profiles and the magnetic field values at the spacecraft altitude were obtained from those ionograms. These results allow to obtain the scale height value for each profile from the three orbits studied. Values of transition altitude have been also estimated.

The other two objectives are focused mainly on mathematical developments from the discretization of:

- * The equation of motion of a charged particle influenced by the action of a magnetic field.
- * The continuity equation for the electric field generated inside a dust devil.

Results

The work developed along this thesis, has helped to achieve a better understanding of three fundamental aspects of the processes observed on Mars.

It has been developed a numerical scheme that can determine the state of confinement of charged particles when are under the influence of magnetic fields. The proposed scheme reduces the number of constraints needed to solve the equation of motion, and works with magnetic fields expressions without any restrictions.

On the other hand, it has been demonstrated the direct influence of the action of the induced magnetic field on the martian ionosphere. Furthermore, the values were determined from the corresponding scale height and the transition altitude for each profile, allowing to establish the influence limit of the magnetic field.

Finally, an alternative method for the analysis of the temporal evolution of the electric field generated inside a dust devil, arises from collisions that take place between the powder grains. From the new method, three possible discretization of the continuity equation for the electric field, depending on the forces that are taken into account, have been studied. Also, a detailed analysis of the influence of the main parameters of the scheme on the study results is provided.

Conclusions

The work done throughout this Thesis has allowed to reach the following conclusions from the proposed objectives.

Objective 1

A numerical scheme to study different particle trajectories under different configurations of magnetic fields, obtained from different magnetized sources, has been proposed. This scheme, is a tool of great interest because it allows to analyse any kind of particle in any magnetic field. Therefrom, have been reproduced the trajectories confined for three particles (electron, proton and alpha particle) under three configurations of magnetic field in the martian environment. The differences between trajectories are due to the properties of each particle as well as to the initial conditions for position and speed configurations.

Objective 2

From MARSIS radar data, it has been confirmed the influence of the induced magnetic field (present in the solar wind) in the ionosphere. This result was obtained from the scale height plasma values (both the characteristic of the region dominated by photochemical processes such as transport phenomena) and the transition altitude. It has been also calculated the values of the magnetic field at the spacecraft height, along each studied orbit. On the other hand the analysis of the balance of pressures (ionospheric and solar wind) has been given with great precision values for temperature and magnetic field of the plasma.

Objective 3

Finally, we have developed a new method for solving the equation of continuity of the electric field within a dust devil. From it, both the temporal evolution of the electric field and the electric breakdown within a dust devil on the martian surface (around ~ 10 kV/m in the case of Mars) is obtained. Also the relevance of the size and density of particles in the electric field obtained values is confirmed.

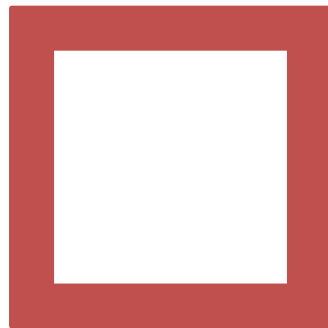
This work is collected in the following scientific publications:

Ramírez-Nicolás, M., Usero, D., and Vázquez, L. Numerical studies of charged particles in a magnetic field : Mars application, Cent. Eur. J. Phys 12, 521-531, 2014.

Ramírez-Nicolás, M., Usero, D., Velasco, M.P., and Vázquez, L. Numerical study of a charged particle in a general magnetic field, International Journal of Pure and Applied Mathematics (sent), 2015.

Ramírez-Nicolás, M., Sánchez-Cano, B., Witasse, O., Blelly, P.-L. The effect of the induced magnetic field on the electron density vertical profile of the Mars' ionosphere: a Mars Express MARSIS radar data analysis and interpretation, Planet Space Sci (under review), 2015.

Ramírez-Nicolás, M., Herraiz, M., Vázquez, L. Electric field analysis from a numerical scheme on Mars, (in preparation).



MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS



MOTIVATION AND AIMS

En los últimos años las misiones a Marte han aumentado en número así como en la calidad de los instrumentos. Las últimas misiones han proporcionado gran cantidad de datos que nos han permitido realizar nuevos descubrimientos, así como adquirir nuevos conocimientos acerca del planeta rojo. Entre estas misiones destacan el orbitador de la Mars Express, los rovers Spirit y Opportunity, o la “recién” llegada MAVEN. Gracias a estas misiones se podrá perfeccionar tanto el conocimiento de la historia pasada, presente y futura de Marte.

La llegada de nuevos instrumentos a Marte hace necesario un buen estudio y análisis, en la Tierra, de los parámetros y características de los mismos, con la intención de obtener los mejores resultados in situ.

En esta Tesis se plantean tres objetivos diferentes con el objetivo de obtener la mayor información posible desde un punto de vista científico así como de instrumento. De esta forma se podrían establecer así valores y rangos útiles en las configuraciones y calibraciones de los instrumentos de las futuras misiones. Estos objetivos se puede resumir del siguiente modo:

Interacción de las partículas cargadas eléctricamente con campos magnéticos

El campo magnético en Marte es una de las características más importantes del planeta. Marte carece de un campo magnético global, sin embargo se ha podido confirmar la existencia de anomalías magnéticas importantes en el hemisferio sur. Existen diferentes teorías acerca del origen de las mismas (teoría de las fuentes magnetizadas) y de los fenómenos que se observan sobre éstas, como las auroras.

En esta Tesis se ha analizado el comportamiento descrito por diferentes partículas cargadas eléctricamente bajo campos magnéticos generales. Con este propósito, el objetivo se ha centrado en generar un esquema numérico que permita analizar dicho comportamiento con el mínimo número de ligaduras, tanto para el tipo de partículas como para los campos magnéticos empleados. Así mismo, se ha analizado el momento angular de las partículas desde un punto de vista discreto y continuo. Tanto la metodología como los resultados se presentarán en los Capítulos 2 y 4.

Interacción del viento solar con la ionosfera marciana

Gracias a los datos facilitados por el radar MARSIS a bordo de la misión MARS EXPRESS se ha podido obtener una visión más detallada de la forma y comportamiento de la ionosfera marciana. La ionosfera, marciana al igual que ocurre en la Tierra, juega un papel fundamental en lo que se refiere a las comunicaciones así como en la dinámica del planeta.

Por este motivo en esta tesis se plantea el estudio del efecto del campo inducido sobre la ionosfera. Para ello se analizarán tres órbitas de la misión Mars Express a partir de las cuales podamos observar dicho efecto, compresión de la ionosfera. Con éste propósito se trabajará con parámetros característicos del comportamiento de la ionosfera como lo son la altura de escala del plasma y la altura de transición.

Tanto el estudio, como los principales resultados se describen en detalle a lo largo del Capítulo 5.

Campos eléctricos obtenidos a partir de la interacción de partículas de polvo

En lo que se refiere a los instrumentos en superficie, uno de los efectos más importantes es el polvo marciano. Estas partículas se depositan sobre cualquier superficie provocando dificultades en el funcionamiento y durabilidad de los mismos. Por otra parte son las responsables de generar campo eléctricos, capaces de interferir igualmente con los instrumentos.

Al respecto, en esta Tesis se presenta un nuevo modelo de evolución temporal del campo eléctrico basado en el esquema numérico desarrollado en el Capítulo 4. Los resultados de dicho estudio y la discusión de los resultados quedan recogidos en los Capítulos 3 y 6.

In recent years Mars missions have increased in number and quality of their scientific payload. Last missions have provided large amount of data that allowed us to make new discoveries and acquire new knowledge about the red planet. Among these missions are the Mars Express orbiter, the Spirit and Opportunity rovers, or the just “arrived” MAVEN. Thanks to these missions the improve of the knowledge of past, present and future history of Mars would take place.

The arrival of new instruments to Mars, makes necessary a good study and analysis of them at Earth, to get the best measurements on Mars.

In this Thesis three different objectives have been proposed in order to get information from a scientific point of view, as well as, to improve instruments. In this way, set values, useful ranges configurations and calibrations values for the instruments in future missions are very important. These objectives can be summarized as follows:

Interaction of electrically charged particles with general magnetic fields

The magnetic field on Mars is one of the most important features of the planet. Mars lacks a global magnetic field, however, has been able to confirm the existence of significant magnetic anomalies in the southern hemisphere. There are different theories about their origin (theory of magnetized sources) and the phenomena observed on them, for example, auroras.

This Thesis analyzes the behavior of different electrically charged particles under general magnetic fields. For this purpose, the main goal has been to generate a numerical scheme in order to analyze this behavior with the minimum number of constraints, both for the particle and the magnetic field used. Also, we have analyzed the angular momentum of the particles from a discrete and continuous point of view. Both, methodology and results will be presented in Chapters 2 and 4.

Solar wind interaction with martian ionosphere

Thanks to the data provided by the MARSIS radar on board Mars Express mission has been able to obtain a more detailed view of the shape and behavior

of the martian ionosphere. The ionosphere of Mars as happens on Earth, plays a key role in communications and the dynamics of the planet.

Therefore in this Thesis will be study the effect of the induced magnetic field on the ionosphere. For this purpose, has been selected three orbits from the Mars Express mission to analyze the resulting compression. To confirm its presence different parameters have been taken into account as the scale height or the transition altitude.

Both the study and the main results are described in detail throughout Chapter 5.

Electric fields obtained from the interaction of dust particles

Regarding instruments on surface, one of the most important effects is the martian dust. These particles are deposited on any surface causing difficulties in the operation and durability of the instruments, moreover they generate electric fields able to interfere with them.

In this Thesis a new model for the temporal evolution of the electric field based on the numerical scheme developed in Chapter 4 has been presented. The results of the study and the discussion of the results are set out in Chapters 3 and 6.

CAPÍTULO

1

MARTE











1.1. Historia de la exploración

Galileo Galilei en 1609 fue la primera persona en observar Marte utilizando un telescopio fabricado por él mismo. A partir de ese momento y gracias a los continuos descubrimientos, Marte dejó de ser el gran desconocido. En 1659 Christian Huygens, utilizando un telescopio refractor (inventado por él mismo), descubre una mancha oscura y triangular sobre la superficie que bautizó como Horologium (“el reloj de arena”). Gracias a esta mancha determinó por primera vez el periodo de rotación, 24h 40min (con un error de 3 min). Además, fue capaz de establecer el tamaño angular de Marte adosando un micrómetro al ocular del telescopio. Unos años después, en 1719, Jacques Philippe Maraldi observó en detalle el casquete polar Sur pudiendo establecer que está descentrado respecto al polo y que su tamaño variaba. Además corroboró la existencia de la mancha localizada por Huygens y fue capaz de identificar varias más que asociaba a nubes de colores pardos. Sin embargo, la relación entre estos dos fenómenos (la variación del tamaño del casquete polar y las manchas marrones) no fue establecida hasta 1777 por William Herschel. Así mismo, identificó el casquete polar Norte y su relación con el casquete del Sur y realizó una colección de croquis del disco marciano en los que detalla características geológicas que conocemos con mayor detalle en la actualidad como Sinus Meridiani y Sinus Sabaeus (aunque los asocia a la existencia de mares). Ya en 1858 el jesuita Angelo Secchi asigna la palabra “*canale*” para referirse a “el reloj de arena” y asemejarlo con formaciones geológicas conocidas en la Tierra. Es por este motivo que la mancha triangular pasa a denominarse “Canale Atlántico” al pensar que caracterizaba la separación entre dos continentes en el polo norte marciano. En esta misma línea, en 1860, Emmanuel Liais identificó las zonas más oscuras observadas como vegetación, mientras que las zonas claras serían identificadas como grandes desiertos. Giovanni Schiaparelli realizó en 1877 numerosas observaciones de Marte con su telescopio. Sin embargo, su resultado más popular fue su teoría de la red de “canales” por la que la mayor parte de la superficie marciana estaba interconectada. La explicación del astrónomo e historiador quedó recogida en obras como “Life on Mars” (Schiaparelli, 1895) *«Más que verdaderos canales, de la forma para nosotros más familiar, debemos imaginar depresiones del suelo no muy profundas, extendiéndose en dirección*

rectilínea por miles de kilómetros, con un ancho de 100, 200 kilómetros o más. Ya he señalado una vez más que, de no existir lluvia en Marte, estos canales son probablemente el principal mecanismo mediante el cual el agua (y con él la vida orgánica) puede extenderse sobre la superficie seca del planeta ».

El interés por conocer más a fondo el planeta rojo llevó al inicio de la aventura de la exploración de Marte a partir de misiones espaciales que comenzó en 1960, aunque no fue hasta finales de esta década, 1969, cuando la misión estadounidense Mariner 6 consiguió realizar un vuelo cercano con éxito. Sin embargo, tan sólo hubo que esperar un par de años más hasta lograr de la mano del programa espacial soviético que un vehículo alcanzara la superficie del planeta. Con el paso de los años se han ido sucediendo diferentes hitos en la exploración marciana a través de las distintas misiones: americanas, soviéticas, rusas, europeas... Desde el año 1960 han sido numerosos los éxitos y fracasos alcanzados en la exploración de Marte. La **Tabla 1-1** resumen las misiones de los últimos doce años (en el Anexo I, se recogen todas las misiones a Marte).

Tabla 1-1. Resumen de las misiones a Marte que se han llevado a cabo desde 2000 hasta la actualidad.

Misión	País	Lanzamiento	Término	Objetivo	Resultado
Mars Express Orbiter		02/06/2003	Operativa	Orbitador	Éxito
Beagle 2		02/06/2003	06/02/2004	Lander	Sin contacto
Spirit		10/07/2003	25/05/2011	Rover	Éxito
Opportunity		07/07/2003	Operativa	Rover	Éxito
Mars Reconnaissance Orbiter		12/08/2005	Operativa	Orbitador	Éxito
Phoenix		04/08/2007	10/11/2008	Lander	Éxito
Phobos-Grunt		08/11/2011	08/11/2011	Lander/Retorno de muestras	Fracaso
Mars Science Laboratory		26/11/2011	Operativa	Rover	Éxito
Mars Orbiter Mission		05/11/2013	Operativa	Orbitador	Éxito
MAVEN		18/11/2013	Operativa	Orbitador	Éxito

1.2. Descripción general

Gracias a todas las investigaciones mencionadas en la Sección 1.1, el conocimiento de Marte no se limita únicamente a ubicarlo como el cuarto planeta de nuestro Sistema Solar, sino que es tal el volumen de datos, teorías, modelos... que surgen en torno al planeta, que la mayor parte de la comunidad científica está de acuerdo en concluir que es el planeta más parecido a la Tierra.

En la actualidad, y tras más de cuatrocientos años de investigaciones, son numerosos los datos que conocemos del planeta. Tiene una masa de 6.4185×10^{23} kg, un diámetro de 6794.4 km y un valor de la gravedad de aproximadamente un tercio la de la Tierra (3.711 m/s^2). Por otra parte, se ha podido determinar que el periodo de rotación es 24,6229 horas mientras que el de traslación es 687 días terrestres; que las oscilaciones de temperatura en superficie oscilan entre los -140°C y 20°C , y la presión entre (0.4–0.87) kPa.

Para conocer con un poco más de detalle el planeta, en esta subsección vamos a describir las principales características del mismo centrándonos en la atmósfera, la topografía y la geología.

∞ Atmósfera

En términos de densidades, la atmósfera de Marte es menos del 1% de la de la Tierra, por lo que la radiación solar consigue alcanzar altitudes muy bajas, llegando incluso a la superficie del planeta. Así mismo, la ausencia de una atmósfera densa provoca que el calor de la superficie pueda escapar sin impedimento alguno. Está compuesta principalmente por dióxido de carbono en un 95 %, un 3 % de nitrógeno, un 1.6 % de argón, y el resto son trazas de oxígeno, vapor de agua y otros gases (Vázquez, 2008). En la [Tabla 1-2](#) se muestran las diferencias en composición entre la atmósfera terrestre y marciana.

Tabla 1-2. Constituyentes atmosféricos de la Tierra y Martes expresados en tanto por ciento en volumen.

Componentes	Tierra	Marte
CO ₂	0.03	95.32
N ₂	78.08	2.70
Ar	0.93	1.60

Componentes	Tierra	Marte
O ₂	20.94	0.13
CO	4·20·10 ⁻⁶	0.07
H ₂ O	0-4	0.03
Ne	1.80·10 ⁻³	0.25·10 ⁻³
Kr	0.11·10 ⁻³	0.03·10 ⁻³
Xe	9.00·10 ⁻⁶	8.00·10 ⁻⁶

En general, la comunidad científica (Jakosky and Phillips, 2001) acepta la teoría por la cual se considera que la atmósfera se disipó por la desaparición de la magnetosfera hace unos 4000 Ma. Sin ésta, el viento solar interacciona directamente con la ionosfera provocando una liberación de átomos y generando así una reducción de la densidad atmosférica. Sin embargo, es lo suficientemente densa como para acoger fuertes vientos y tormentas de polvo.

En cuanto al clima, en general se asemeja al de un frío desierto a gran altitud. Debido a la inclinación del eje de rotación ($\sim 24^\circ$) hace que tenga un ritmo de estaciones climáticas similar al de la Tierra, aunque en este caso, la excentricidad de su órbita y el hecho de que su periodo de rotación sea de 687 días hacen que las estaciones tengan una duración aproximadamente dos veces más largas.

Las extremas condiciones de los largos y fríos inviernos y de los calurosos veranos se ven en parte incrementadas por la poca densidad de su atmósfera, que no ejerce un efecto homogeneizador de temperaturas como puede ocurrir en la Tierra ya que tampoco hay océanos. Las temperaturas que se alcanzan son lo suficientemente bajas como para que el anhídrido carbónico de la atmósfera se congele, formándose los dos polos cubiertos por dos brillantes casquetes polares, claramente visibles al telescopio, formados principalmente por dicho anhídrido carbónico helado. La formación de estos casquetes sigue un ciclo estacional que ha sido observado por los astrónomos durante más de dos siglos. Al llegar el otoño, en la capa de la atmósfera situada sobre los casquetes se forman brillantes nubes de cristales de CO_2 que se precipitan en forma de un fino polvo que hace que el casquete crezca y se extienda, alcanzando incluso latitudes inferiores a los 45° . Cuando las temperaturas empiezan a aumentar, la luz solar evapora la nieve carbónica y los casquetes retroceden durante el

verano hasta un tamaño mínimo que configuran los casquetes permanentes (Kasting, 1991; Krasnopolsky, 2002).

La actividad atmosférica en Marte es muy importante y variada llegando a observarse incluso nubes formadas a partir de pequeños cristales de CO_2 .

∞ Topografía

A pesar de que el tamaño de Marte es tan sólo la mitad del de la Tierra, existen formaciones geológicas extremas. Una de las más importantes es la dicotomía que separa el hemisferio norte, caracterizado por llanuras alisadas por coladas, del hemisferio sur, mucho más antiguo y con formaciones geológicas más importantes. Aunque no existe una explicación única, es posible encontrar múltiples teorías acerca de su origen (Watters et al., 2007; Scott and Carr, 1978). La dicotomía no representa una separación bien definida sino que la forman un conjunto de accidentes geográficos con diferentes propiedades geológicas, alcanzando desniveles de 5 km.

Por otro lado, en Marte se encuentra el Monte Olimpo que, con sus 26 km de altura, es el volcán más grande del Sistema Solar. Este volcán se encuentra en un vasto territorio montañoso conocido como Tharsis. En dicha región se ubican además otros grandes volcanes como el Pavonis Mons o el Arsia Mons que en conjunto forman los Montes de Tharsis. Así mismo, posee el sistema de cañones más grande de todo el Sistema Solar, llamado Valles Marineris, que alcanza los 4000 km de largo y los 7 km de profundidad. Además, en Marte podemos identificar y caracterizar un gran número de cráteres de impacto. El más grande es el Hellas Planitia, el cual se caracteriza por estar cubierto de arena en tonos rojizos claros.

Todas estas estructuras aparecen reflejadas en la **Figura 1-1**, en la cual se muestra además, en un mapa en falso color, las principales características topográficas quedando de manifiesto las diferencias en altitud.

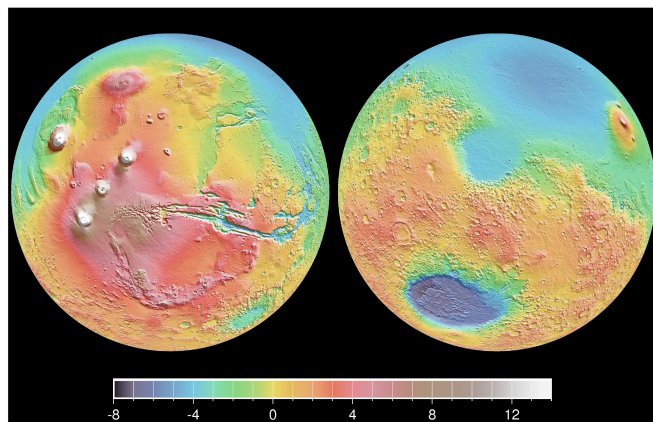


Figura 1-1. Imagen en falso color de la topografía de Marte a partir de los datos del instrumento MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) a bordo de la misión Mars Global Surveyor (MGS). La escala de colores indica en km las diferencias en altura, siendo los colores más oscuros los de mayor profundidad, mientras que los más claros corresponden a los de mayor altura.
(<http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA02820>).

∞ Geología

Como se ha mencionado anteriormente, en la superficie de Marte podemos identificar características morfológicas similares a las de la Tierra o de la Luna como, por ejemplo, cráteres de impacto, campos de lava, volcanes, cauces secos de ríos o dunas de arena. La composición del suelo marciano es, fundamentalmente, basalto volcánico con un alto contenido en óxidos de hierro que proporcionan el característico color rojo de la superficie (Tanaka et al., 2014; Neumann, 2004). Por su naturaleza, se asemeja a la limonita, óxido de hierro muy hidratado. El suelo de Marte se caracteriza fundamentalmente por su alto contenido en ferrosilicatos, siendo sus tres constituyentes principales, por orden de abundancia, el oxígeno, el silicio y el hierro. Contiene: 20.8 % de sílice, 13.5 % de hierro, 5 % de aluminio, 3.8 % de calcio, y también titanio y otros componentes en proporciones menores.

Gracias a las investigaciones que se han llevado a cabo en estos diez últimos años y al inmenso volumen de datos que ha facilitado la misión Mars Express (MEX) de la European Space Agency (ESA), se han podido realizar mapas detallados de las principales especies minerales que han

podido identificarse en Marte (<http://www.esa.int/esl>). Estos mapas permiten analizar la distribución de minerales hidratados, filosilicatos y sales hidratadas, que se forman en presencia de agua. Estos minerales son característicos de los terrenos más antiguos con cráteres, formados hace más de 4000 Ma.

Además se han podido configurar mapas de materiales y minerales, olivino y piroxeno, que corresponden con erupciones volcánicas que ocurrieron de forma masiva hace 3700 Ma.

Asimismo se ha avanzado en el conocimiento de la distribución del polvo. Este material, que oscurece gran parte de la roca subyacente, contiene óxido férrico que se encuentra presente en todo el planeta, principalmente en las llanuras del hemisferio Norte y en la región volcánica de Tharsis.

Se piensa que el polvo rojizo es el resultado de reacciones químicas con la atmósfera y provoca que las rocas ricas en hierro se oxiden lentamente a lo largo de miles de millones de años, dando así a Marte su tono característico.

1.3. Conocimientos previos

En esta Sección vamos a repasar algunos de los conceptos más importantes para el desarrollo de esta Tesis Doctoral. Para ello se ha dividido la sección en cuatro subsecciones. En las dos primeras se va tratar (1) la importancia de las partículas cargadas eléctricamente y su interacción con campos magnéticos (como el que se puede encontrar a nivel global en un planeta como la Tierra o a nivel local como en Marte); y (2) el polvo que se encuentra a lo largo de todo el planeta y participa en fenómenos dinámicos de gran transcendencia, tal y como veremos en el Capítulo 3. En las dos últimas subsecciones se abordarán (3) los campos eléctricos generados por la interacción entre las partículas de polvo en el interior de un *dust devil* así como (4) la interacción entre el viento solar con la ionosfera.

1.3.1. Partículas cargadas eléctricamente

Tanto los estudios como las teorías desarrolladas acerca del comportamiento de las partículas cargadas que se encuentran en movimiento en el seno de un campo magnético surgieron hace más de un siglo. Las primeras referencias datan de 1907 de la mano de C. Störmer por un trabajo pionero en el que se aborda dicho problema en el entorno de la Tierra con el objetivo de entender la naturaleza de los fenómenos aurorales.

Antes de centrarnos en la interacción de estas partículas cargadas con el campo magnético, vamos a centrarnos en el origen de las partículas en sí. La mayor parte de estas partículas procede del Sol. El Sol constituye la fuente electromagnética más importante de nuestro Sistema Solar y se encuentra en el centro del mismo. De entre todas las partes del Sol la corona resulta la más relevante para nuestro estudio ya que al permanecer continuamente en expansión va escapando del entorno solar. Dicha corona está compuesta por partículas ionizadas, fundamentalmente electrones y protones, a altas temperaturas formando un plasma. Dichas partículas avanzan por el espacio a grandes velocidades comprendidas entre los 200 km/s y los 890 km/s, siendo la velocidad media de unos 450 km/s. A estas velocidades el viento solar recorre grandes distancias alcanzando estrellas, cometas y planetas. Los altos valores energéticos de estas partículas, que oscilan entre los 10 keV y 100 keV hacen fundamental el conocimiento y análisis de la interacción entre el viento solar y el entorno del planeta (Sadovski and Skalsky, 2014; Binbin et al., 2013), así como de los efectos, como por ejemplo las auroras (Nakamura, 2011). Por ello existen numerosos estudios con el objetivo de entender cada uno de los procesos que ocurren en dicha interacción.

En el caso de Marte la influencia del Sol es muy grande ya que no posee un campo magnético global (Langlais and Quesnel, 2008; Langlais et al., 2004) que lo proteja. Por este motivo, las partículas muy energéticas son capaces de interaccionar directamente con la alta atmósfera. A pesar de las limitaciones obvias, en los últimos años los estudios relacionados con esta interacción han aumentado exponencialmente. Un ejemplo de ello son los datos aportados por Mars Express (Edberg et al., 2009). Gracias a los mismos se pudo realizar un análisis detallado del efecto del viento solar y su presión sobre los límites del

plasma marciano y en la exosfera, región de la atmósfera en la que los gases que la forman van dispersándose lentamente hasta que la composición es similar a la del espacio exterior. Brain et al. (2010) realizó una exhaustiva comparativa entre los diferentes modelos para explicar dicha interacción.

Además de lo mencionado anteriormente una de las consecuencias directas de los efectos de las cargas son los fenómenos luminiscentes que ocurren tanto en la Tierra como en Marte. Por el efecto del atrapamiento de las partículas cargadas en las líneas de campo magnético y su interacción con los átomos de la atmósfera, en Marte es posible identificar auroras similares a las de la Tierra. La primera observación de una aurora en Marte la dió a conocer Bertaux et al. (2005a), y gracias a los datos facilitados por el instrumento SPICAM (Spectroscopy for Investigation of the Atmosphere of Mars) a bordo de la misión Mars Express se pudieron ratificar los resultados previos. Las auroras se han observado durante la noche en regiones cercanas a las fuentes magnéticas corticales de mayor intensidad.

1.3.2. Polvo marciano

A pesar de que se conocía desde las primeras observaciones de Marte, gracias a las últimas imágenes y análisis realizados in-situ por la misión Mars Science Laboratory (MSL), se ha podido confirmar el gran volumen de polvo que cubre el planeta.

El polvo juega un papel de gran relevancia en la dinámica del planeta. En la atmósfera marciana, y de forma permanente, se encuentran en suspensión partículas de polvo de diferentes tamaños cuya concentración varía en función de la época del año y de la estación. Es por ello que el ciclo de polvo constituye un elemento crucial en el sistema climático marciano (Spiga et al., 2013; Smith, 2004; Montabone et al., 2005). Un aumento de concentración de polvo en la atmósfera, hace que las partículas de polvo actúen como medios dispersivos y absorban parte de la luz solar, al mismo tiempo que actúan como escudo para evitar el escape de radiación solar. El efecto resultante es un calentamiento de la atmósfera marciana (Gierash and Goody, 1972).

Al final de la primavera marciana y principios del verano en el hemisferio Sur, las regiones más próximas al ecuador se encuentran recalentadas,

formándose impresionantes corrientes de aire. Estas corrientes arrancan el fino polvo de la superficie marciana y lo elevan a alturas superiores a los 40 km, formando extensas nubes amarillas que oscurecen la superficie del planeta durante semanas e incluso durante meses. Estos vientos modifican sensiblemente la superficie del planeta, que se ve erosionada en unas zonas mientras que en otras se depositan los materiales arrastrados, a veces formando extensos campos de dunas. En la **Figura 1-2** se muestran dos imágenes tomadas durante 2001 por el Telescopio Espacial Hubble. Es la misma imagen, tomada con tres meses de diferencia, en la que se puede ver una tormenta de polvo que afectó a todo el planeta. Estas tormentas no tienen un efecto local, sino que alcanzan dimensiones globales afectando al planeta entero (Martin and Zurek, 1993). Cantor et al. (2001) catalogó unas 780 tormentas de polvo de carácter local-regional que ocurrieron durante 1999, haciendo un detallado análisis de las dependencias geográficas y estacionales de las mismas.

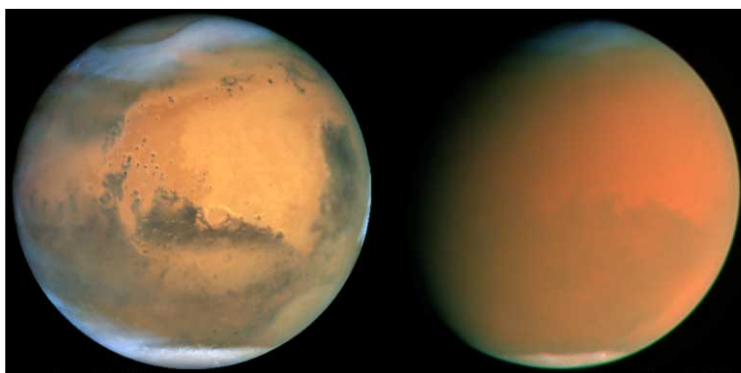


Figura 1-2. Imágenes tomadas por el telescopio espacial Hubble. La imagen de la izquierda corresponde al 26 de Junio de 2001, mientras que la de la derecha fue tomada el 4 de Septiembre de 2001. (NASA, J. Bell (Cornell), M. Wolff (SSI), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)).

Sin embargo, la actividad más común en Marte son los eventos que ocurren a menor escala como por ejemplo los dust devils (remolinos de polvo) los cuales tienen lugar a lo largo de todo el año (Delory et al., 2006; Newman et al., 2002; Fisher et al., 2005). Estos remolinos se encargan de transportar grandes cantidades de polvo que inicialmente se encontraban en la superficie marciana.

El efecto de los dust devils (Figura 1-3) no sólo reside en el transporte de polvo, sino que provocan una mayor opacidad atmosférica.



Figura 1-3. Fotografía tomada por el rover Spirit en el Sol 486, que corresponde con el día 486 del año marciano.
(http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/2005_dust_devil.html).

1.3.3. Campos magnéticos y eléctricos

∞ Campo magnético

Es bien conocido que Marte carece de un campo magnético global similar al de la Tierra. Sin embargo sí se han identificado firmas magnéticas. Los primeros indicios que certificaron la presencia de un campo magnético asociado a Marte fueron evidenciados por Acuña et al. (1998). El origen de este campo magnético sigue siendo a día de hoy una incógnita, aunque existen diferentes teorías al respecto. Por una lado, las líneas de investigación que apoyan la idea de que las firmas magnéticas se deben a la magnetización remanente de los materiales que se encuentran en la superficie (Connerney et al., 2003). Por otro, algunos autores consideran que Marte tuvo un campo magnético a escala global de origen interno y que por factores externos se fue debilitando hasta alcanzar su estado actual (Russell, 1978a; Russell, 1978b; Ness, 1979; Slavin et al., 1991; Verigin et al., 1991). Así mismo han surgido otras hipótesis que contradicen la teoría de un campo magnético interno (dinamo), de acuerdo con lo publicado por Riedler et al. (1989).

Con la llegada de la Mars Global Surveyor (MGS), y gracias a los datos proporcionados por el magnetómetro a bordo (MAG-ER), se abrió la posibilidad de dar algunas respuestas acerca del campo magnético marciano.

Durante la fase de aerofrenado (aerobraking) de la misión MGS, en la que la nave describía órbitas elípticas alcanzando altitudes inferiores a 100 km, se realizaron tomas de datos. A partir de ellos (Figura 1-4) se pudo concluir definitivamente que el campo magnético marciano no es global, por lo que la teoría de la dinamo no resulta la más convincente (Connerney et al., 2001, 2003). Los datos revelaron cómo los valores del campo magnético no están distribuidos de una forma uniforme sino que los valores de campo más elevados se distribuyen a lo largo de regiones que se extienden de forma lineal según la dirección este-oeste en el hemisferio sur (entre los 150 ° y los 240 ° de longitud). Sin embargo en el hemisferio norte estos valores de campo se debilitan considerablemente.

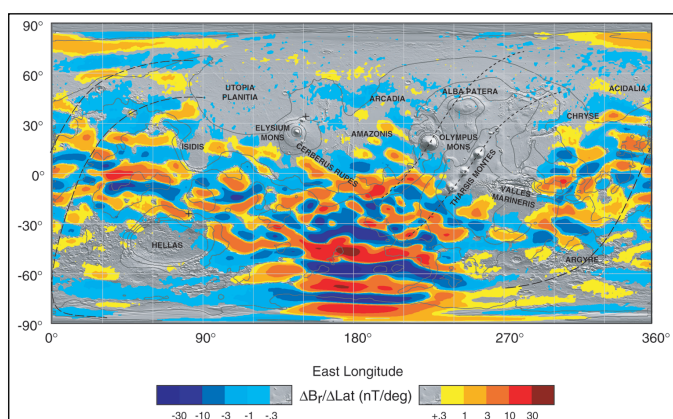


Figura 1-4. Ilustración de la componente radial de las anomalías magnéticas corticales basada en los datos del instrumento MAG/ER a bordo de la misión Mars Global Surveyor (Connerney et al., 2005).

Desde el momento en el que estuvieron disponibles los datos magnéticos registrados in-situ surgieron un gran número de modelos con el objetivo de poder explicar y entender los patrones de las anomalías magnéticas observados. El primer modelo a escala global fue desarrollado por Purucker et al. (2000). Se empleó una técnica de fuente equivalente, en la cual se representó el campo magnético como una superposición de muchos dipolos prácticamente

equiespaciados cada 111 km a lo largo de una esfera con radio 3394 km. El modelo permite construir prácticamente un mapa completo a una altura normalizada de 200 km de la componente radial del campo magnético.

Por otro lado tenemos los modelos que se basan en desarrollos en armónicos esféricos. Algunos de los modelos más importantes son los descritos por Arkani-Hamed. (2001a, 2002a), Voorhies et al. (2002) y Cain et al. (2003). Sin embargo, mientras el modelo de Arkani-Hamed es una expansión de grado de orden 50 completado con mapas de observaciones orbitales, los modelos de Voorhies y Cain utilizan una expansión de grado de orden hasta 90. De esta forma se consigue una mayor resolución espacial. Este tipo de modelos permite realizar interpolaciones de los resultados a partir de los datos disponibles de una forma muy sencilla, enriqueciendo los resultados del propio modelo.

∞ Campo eléctrico

En la Tierra podemos encontrar diferentes procesos por los que se evidencia la existencia de campos eléctricos. Se conocen varios sistemas capaces de generar campos eléctricos y que van asociados a fenómenos naturales: procesos atmosféricos, corrientes que circulan paralelamente a la superficie terrestre, intercambio de cargas eléctricas entre la superficie y la atmósfera...(Stow, 1969; Jackson and Farrell, 2006; Renno and Kok, 2007).

- * El resultado de la ionización de la atmósfera por el efecto de la radiación solar por el movimiento de nubes de iones es la electricidad atmosférica.
- * Las corrientes de la Tierra constituyen un sistema a nivel global de circuitos cerrados de corriente eléctrica distribuidos cuasi uniformemente a ambos lados del ecuador, además de circuitos más pequeños cerca de los polos. La superficie de la Tierra tiene carga eléctrica negativa.
- * La carga negativa de la superficie terrestre atrae a los iones positivos de la atmósfera generando un flujo de electricidad.

Además, existen otros procesos que producen perturbaciones eléctricas importantes y que son los más relevantes para esta Tesis . Uno de ellos son las

tormentas de polvo que ocurren en la baja atmósfera. A pesar de que no se conoce en detalle el mecanismo de carga que tiene lugar en las nubes de polvo, existen datos que concluyen que son eléctricamente activas (Melnik and Parrot, 1998). En concreto, se han realizado varios experimentos centrados en los campos eléctricos medidos en el interior de los dust devils. Los resultados presentados por Freier. (1960) y Crozier. (1964) muestran cómo un dust devil terrestre de ~ 10 m de ancho por $\sim (100-200)$ m de alto puede generar un campo eléctrico en corriente continua capaz de superar los cientos de voltios por metro.

En Marte, tanto las tormentas de polvo como los dust devils son mucho mayores que los terrestres, como veremos en mayor detalle en el Capítulo 3. En los dust devils marcianos se espera que también se puedan detectar estas descargas eléctricas. Por ello hay numerosos trabajos en los que se trata de construir modelos capaces de reproducir lo que se espera que ocurra en Marte. Melnik and Parrot. (1998), Farrell et al. (2003, 2006), Zhai et al. (2006), Michael et al. (2007) son algunos de los autores que se han centrado en el estudio de estos campos eléctricos.

En la actualidad hay diferentes grupos que siguen centrando sus esfuerzos en comprender los procesos que ocurren en el interior de un dust devil capaz de generar un campo eléctrico. Uno de estos grupos es el liderado por Francesca Esposito (INAF-Astronomical Observatory of Capodimonte, Nápoles) involucrado en la misión a Marte ExoMars. En dicha misión irá a bordo, por primera vez, un instrumento llamado MicroARES que permitirá realizar mediciones in-situ de los valores de campo eléctrico. Estas medidas no sólo se realizarán en condiciones atmosféricas tranquilas, sino durante tormentas de polvo y en presencia de dust devils.

1.3.4. Ionosfera marciana

La ionosfera es la parte de la atmósfera ionizada permanentemente, que contiene una cantidad significativa de electrones libres e iones (Ratcliffe, 1960). En la Tierra esta región se extiende desde los (50-60) km de altura hasta, aproximadamente, los 2000 km, localizándose el máximo de densidad electrónica ($\sim 10^{12} \text{ e}^-/\text{m}^3$) entre los (300-500) km. Es un medio eléctricamente

neutro y conductor que se comporta como un plasma pudiendo influir en las propiedades eléctricas del medio (Hargreaves, 1960).

En Marte también existe esta región aunque está mucho menos estudiada ya que los primeros datos empezaron a llegar de la mano de las misiones Viking 1 y 2. En la actualidad tenemos un mayor conocimiento de la misma. A grandes rasgos es una capa que se encuentra entre los 90 km y los (350-400) km con un máximo de densidad electrónica $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ e/m}^3$ entre los (125-140) km de altura (Schunk and Nagy, 2008). Hanson et al., (1977) pudo proporcionar información acerca de la composición iónica de la misma, resultando el ión predominante el O_2^+ , mientras que las poblaciones de CO_2^+ y O^+ se encuentran en unas cantidades minoritarias. Al igual que en la Tierra, en la atmósfera marciana se pueden distinguir diferentes capas con propiedades diferentes. Las dos principales se encuentran situadas a unos 110 km y 135 km de altura, existiendo además una tercera capa esporádica más cercana a la superficie. Esta tercera capa se encontraría entre los 65 km y 110 km y recibe el nombre de meteórica.

Hasta la llegada de la misión Mars Express a Marte en 2003, los únicos datos disponibles de la ionosfera, eran unos perfiles de radio ocultación de la misión MGS. Sin embargo, a bordo de la MEX se encuentra el radar MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding) que operando en su modo AIS (Active Ionospheric Sounding) ha proporcionado nuevos datos en forma de ionogramas que han ayudado al conocimiento de la alta atmósfera marciana (Sánchez-Cano et al., 2013). Dicho instrumento lo forman tres antenas: dos dipolos de 20 m cada uno y un monopolo de 7 m perpendicular a los anteriores. Esta configuración opera en dos modos, el sub-superficie con el objetivo de esclarecer lo que se encuentra bajo la superficie marciana y el mencionado AIS. En el modo de sondeo ionosférico la antena transmisora manda una señal formada por 160 frecuencias equiespaciadas logarítmicamente entre 0.1 MHz y 5.5 MHz (Gurnett et al., 2010). Al representar los ecos obtenidos en función del tiempo de retardo, Δt , para cada una de las frecuencias barridas y dibujarlas frente a éstas (frecuencias) se obtiene lo que se conoce como ionograma. A partir de estos ionogramas en la Sección 2.2.2 se muestran parte de los resultados más relevantes de ésta Tesis.

CAPÍTULO

2

CAMPO MAGNÉTICO DE MARTE

Los planetas de nuestro Sistema Solar presentan diferentes configuraciones e intensidades respecto a sus campos magnéticos, debido a su estructura interna (campo magnético interno) y a su interacción con el Sol (campo magnético externo) (Van Hoolst., 2003; Ness, 1976; Bauer et al., 1977). Las características de cada uno de estos campos están resumidos en la **Tabla 2-1**, la cual proporciona unos valores de referencia (Lanzerotti and Krimgis, 1985), alguno de los cuales se utilizan a lo largo de esta Tesis.

Tabla 2-1. Resumen de las principales características de los campos magnéticos correspondientes a los planetas del sistema Solar.

Planeta	Campo magnético superficie (nT)	Momento Magnético (Am²)
Mercurio	Intrínseco, 300	$5.0 \cdot 10^{19}$
Venus	Local, < 30	$6.6 \cdot 10^{19}$
Tierra	Intrínseco, 30000	$7.8 \cdot 10^{22}$
Marte	Local, 60	$2.6 \cdot 10^{19}$
Júpiter	Intrínseco, 430000	$1.5 \cdot 10^{27}$
Saturno	Intrínseco, 22000	$9.0 \cdot 10^{25}$
Urano	Intrínseco, 23000	$5.0 \cdot 10^{24}$
Neptuno	Intrínseco, 13000	$2.0 \cdot 10^{24}$

Cada planeta presenta una estructura interna diferente lo que conlleva a configuraciones magnéticas muy variadas. Se puede hablar de campos magnéticos globales como el de la Tierra, planetas que prácticamente carecen de campo magnético como Venus o planetas como Marte que invitan a pensar en la existencia hace muchos millones de años de un campo magnético global, pero que en la actualidad sólo se detectan pequeñas firmas magnéticas en regiones muy concretas del mismo. En el caso de la Tierra, su estructura interna (corteza, manto, núcleo externo y núcleo interno) favorece la generación y mantenimiento de un campo magnético de origen interno. El campo interno actual se puede asimilar al producido por un dipolo magnético situado en el centro del planeta con una inclinación de 10,5 ° respecto su eje de rotación. El proceso que explica el mantenimiento del campo magnético principal (interno) de la Tierra es una dinamo auto-sustentada. En este mecanismo, el movimiento del fluido en el núcleo exterior de la Tierra arrastra el material conductor (hierro líquido) a través de un campo magnético débil (ya existente) generando una corriente eléctrica. La corriente eléctrica produce a su vez un campo

magnético que también interactúa con el movimiento del fluido para crear un campo magnético secundario. Ambos campos son más intensos que el original.

El campo magnético global al interactuar con el viento solar forma la magnetosfera que protege la Tierra de la acción directa de la radiación cósmica así como de la radiación procedente del Sol (**Figura 2-1**).

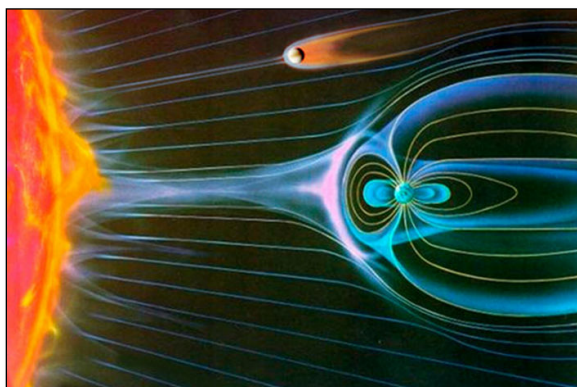


Figura 2-1. Ilustración comparativa de las magnetosferas de la Tierra (coloreada en azul) y de Marte (coloreada en rojo) en su interacción con el Sol.

La forma de la magnetosfera es característica de cada planeta. Para el caso de la Tierra, en la dirección del Sol esta región está comprimida y alcanza un tamaño de entre 6 y 10 radios terrestres. Sin embargo la región opuesta al Sol, conocida como magnetocola, alcanza unas dimensiones de 200 radios terrestres.

En Marte (**Figura 2-1**) dicha magnetosfera no existe como en la Tierra ya que el campo magnético del planeta no es de carácter global.

2.1. Campo magnético marciano

La ausencia de un campo magnético global en la actualidad en Marte ha llevado a la formulación de numerosas teorías al respecto. Son numerosos los estudios acerca del origen del campo magnético marciano, desde la existencia de una dinamo primigenia hasta hipótesis que asocian dichas trazas con la expansión de suelo oceánico, tal y como ocurre en la Tierra (Connerney et al., 1999) o con fuentes magnetizadas que produzcan dichas firmas (Connerney et al., 2003).

La más aceptada desde un punto de vista global, hasta la fecha es la propuesta de la existencia de una dinamo, similar a la de la Tierra, en los primeros años de existencia del planeta (Curtis and Ness, 1988; Arkani-Hammed, 2001; Arkani-Hammed et al., 2004). Sin embargo existe una gran controversia en cuanto a la intensidad del mismo, el instante en el que desapareció y el motivo por el que las anomalías magnéticas remanentes de mayor intensidad se ubican en el hemisferio sur del planeta. Para que la existencia de la dinamo fuera plausible, la estructura interna de Marte debería caracterizarse por poseer un núcleo convectivo y eléctricamente conductor el cual favoreciera el funcionamiento de dicha dinamo por miles de millones de años. Con el objetivo de explicar la teoría de la dinamo marciana se han propuesto varios escenarios basados en diferentes modelos de fuentes de energía, como la solidificación del núcleo interno (Schubert et al., 2000), transiciones en los procesos de convección que ocurren en el manto (Stevenson, 2001) o las relacionadas con evoluciones termodinámicas (Williams and Nimmo, 2004). En general, se puede encontrar a lo largo de la literatura (Schubert et al., 1992; Stevenson, 2001; Spohn et al., 2001), numerosos modelos sobre la evolución de Marte con un núcleo fundido formándose a los inicios, justo después o durante el proceso de acreción, es decir, hace unos (4.5-4.6) miles de millones de años (Ga).

Sin embargo, explicar el funcionamiento de la dinamo resulta igual de importante que entender a partir de qué instante y por qué dejó de funcionar. Acuña et al. (1999) señaló que el cese del funcionamiento se produjo a los inicios de la evolución del planeta. Señaló, cómo la superficie situada sobre los cráteres de impacto como Hellas, Isidis, Argyre y la de las tierras bajas del norte carece de un campo magnético reseñable (Connerney et al., 2003). Se piensa que dichos cráteres datan de hace unos 4 Ga, considerándoles responsables del cese de la actividad de la dinamo en los inicios de la evolución del planeta (Hartmann, 1978; 1995; Neukum and Wise, 1976; Neukum and Hiller, 1981). Sin embargo, existen teorías alternativas como la propuesta por Schubert et al. (2000) y Stevenson. (2001) en la que afirma que los cráteres de impacto son anteriores al inicio de la aparición de la dinamo. En lo propuesto por Schubert et al. (2000), la magnetización de las tierras del hemisferio sur se debe a eventos de

calentamiento y enfriamiento que se produjeron con posterioridad a la era de los grandes impactos.

Todos estos escenarios tratan el campo magnético marciano desde un punto de vista global, en el que parece evidente la intensa magnetización de la corteza. Esta magnetización se distribuye a lo largo de cientos de kilómetros y ha persistido durante miles de millones de años.

A pesar de todo ello con los primeros resultados proporcionados por la Mars Global Surveyor (se verá en detalle en la Sección 2.2) surgieron diferentes teorías e hipótesis con el objetivo de explicar las medidas obtenidas del campo remanente desde un punto de vista local o regional.

2.2. Medidas de Campo Magnético

2.2.1. Medidas directas

Antes de la llegada de la Mars Global Surveyor a Marte, las misiones previas tan sólo pudieron proporcionar una estimación del límite superior del momento magnético del planeta Trotignon et al. (1993).

El experimento de campo magnético a bordo de la MGS que proporcionó los primeros resultados de las anomalías magnéticas es muy similar al que se desarrolló para la misión Mars Observer (MO), que no consiguió alcanzar Marte en 1993 (Acuña et al., 1992). Dicho experimento proporcionó medidas vectoriales in situ del campo magnético de una región muy amplia del planeta (Figura 2-2) durante su fase de aerofrenado. Estos resultados se obtuvieron a partir de un instrumento constituido por dos magnetómetros fluxgate triaxiales (MAG) y un reflectómetro de electrones (ER). El conjunto de valores corresponden con los datos promediados registrados sobre el hemisferio nocturno. Gracias a este conjunto de valores se obtuvo por primera vez medidas de campo magnético por debajo de la ionosfera marciana (~70-400) km, generando uno de los primeros mapas de campo magnético (Figura 2-2).

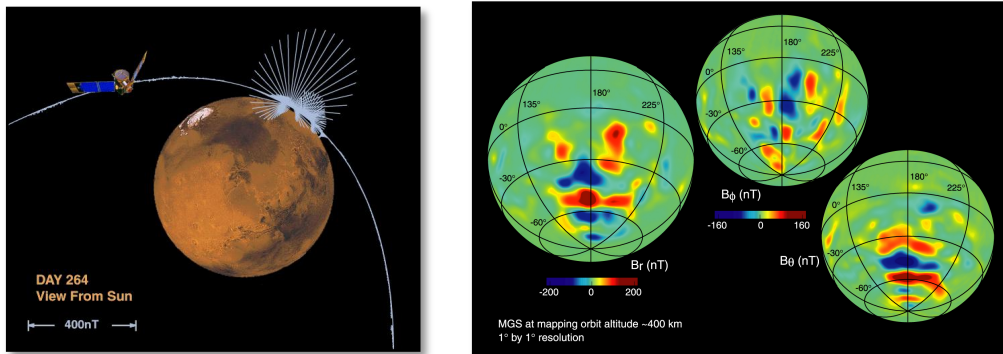


Figura 2-2. Izquierda, ilustración de los vectores de campo magnético tomados en Marte (vista desde el Sol) por la misión MGS en el día 264. Derecha, proyecciones ortográficas de las tres componentes del campo magnético (B_r , B_θ , B_ϕ) a una altura nominal de 400 km (Connerney et al., 2001).

A los datos iniciales registrados por el magnetómetro hasta los 400 km, se pudieron adherir los registrados en la fase de aerofrenado de la nave cuando alcanzó los 100 km de altitud. Gracias a estos datos y a los proporcionados por el instrumento ER, dicho mapa ha podido mejorarse. Así Lillis et al. (2007) actualizaron y mejoraron el mapa de campo magnético a partir de las medidas de MAG-ER aplicando modelos cinéticos del transporte de electrones. De este modo se consiguió un mapa de anomalías magnéticas con una mayor resolución a 185 km (Figura 2-3) de altura en lugar de a 400 km.

En cualquiera de las representaciones de los valores de campo magnético (e.g. Figura 2-3), es posible observar las grandes diferencias existentes entre el hemisferio Norte y el hemisferio Sur del planeta. Estas diferencias entre hemisferios hacen resaltar de una forma más evidente la presencia de la dicotomía en el planeta. Los valores de las anomalías de campo magnético muestran un patrón bien definido alternando el signo de las mismas a lo largo bandas de cientos de kilómetros en la dirección Este-Oeste. Esta alternancia de valores se concentra entre los 120° y los 210° de longitud, y entre los 0° y los 90° Sur. Además, a la vista de los resultados queda de manifiesto que en los grandes cráteres de impacto no se aprecia ninguna firma magnética.

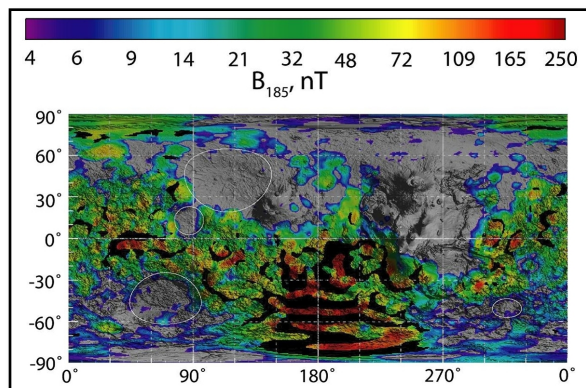


Figura 2-3. Mapa de campo magnético suavizado a partir de datos de ER en proyección cilíndrica. La escala de colores corresponde con los valores de campo magnético cortical en escala logarítmica a una altura de 185 km. Dichos valores se encuentran superpuestos a un mapa de topografía MOLA (Smith et al., 2001) en escala de grises.

Desde la llegada de la MGS y hasta el año 2011 ninguna otra misión ha llevado un magnetómetro a bordo para realizar medidas in-situ del campo magnético marciano. En la misión Phobos Grunt (2011), hay que destacar la sonda meteorológica MetNet. Fue desarrollada conjuntamente entre Finlandia (Finnish Meteorological Institute, FMI), Rusia (Russian Space Research Institute, IKI y Lavochkin Association, LA) y España (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA y Universidad Complutense de Madrid, UCM). Los tres países colaboraron activamente tanto en el campo científico como en la planificación y desarrollo de instrumentos. A pesar de que la misión no consiguió salir de la órbita de la Tierra, se pretende que en futuras misiones alcance la superficie marciana y se convierta en la primera de una red de sondas meteorológicas distribuidas a lo largo del planeta. Esta estación meteorológica estaba constituida por instrumentos para medir la presión, la humedad (MetBaro, MatHumi) y la temperatura. Pero también llevaba a bordo una cámara panorámica (PanCam), un sensor de irradiancia solar (MetSIS) así como un sensor de polvo (DS). La gran novedad consistía en un magnetómetro (MOURA) que hubiera proporcionado los primeros valores in-situ del campo magnético marciano tanto en la fase de descenso como en superficie. Todos estos instrumentos formaban parte de una cápsula que debía penetrar en la superficie marciana. Desafortunadamente dicha misión fracasó y no consiguió salir de la

órbita Terrestre. Sin embargo, un nuevo intento para alcanzar la superficie de Marte con esta red de estaciones meteorológicas podría tener lugar en 2016.

En la actualidad ha surgido una nueva oportunidad para estudiar con mayor detalle el campo magnético marciano con llegada de la misión, MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution mission) a Marte. Esta misión se lanzó el 18 de noviembre de 2013 entrando en la órbita marciana el 21 de septiembre de 2014. El principal objetivo consiste en la exploración de la alta atmósfera y de la ionosfera así como su interacción con el viento solar. Entre los instrumentos que lleva a bordo destacan los analizadores de electrones (SWEA) e iones (SWIA) presentes en el viento solar, una sonda que analizará la distribución y densidad de la ionosfera así como la temperatura de los electrones en la misma (Langmuir Probes and Wave), y un magnetómetro (MAG) que proporcionará medidas de campo magnético con el objetivo de entender mejor su distribución así como de mejorar los mapas y modelos que existen hasta la fecha.

2.2.2. Medidas indirectas: datos Mars Express

Los valores de campo magnético se pueden obtener de forma directa, tal y como se ha descrito en la sección anterior (Subsección 2.2.1), o de forma indirecta como se describe a lo largo de esta subsección. Para ello en este trabajo se ha trabajado directamente con los datos proporcionados por el radar MARSIS.

MARSIS es un radar de baja frecuencia el cual transmite pulsos y recibe los correspondientes ecos. En su modo activo de medida es capaz de sondear la ionosfera marciana con el objetivo de entender sus características y su interacción con el viento solar (Chicarro et al., 2004). Para ello MARSIS transmite un pulso a una frecuencia f y la intensidad del eco reflejado en el radar se mide en función del retardo temporal. El modo activo realiza sondeos ionosféricos cuando la nave se encuentra en una altura comprendida entre 250 km y 1200 km, tanto de día como de noche. Se emiten pulsos sinusoidales con una duración nominal de 91.4 μ s enviando 160 frecuencias que en orden ascendente temporal cubren un rango entre los 100 kHz y los 5.5 MHz (Picardi et al., 2004). El tiempo de retardo de la llegada del eco, se determina mediante

el muestreo de las intensidades recibidas de la señal en 80 intervalos de tiempo equiespaciados.

Para que el análisis de los datos de MARSIS sea más sencillo se muestran en diferentes formas, entre ellas los ionogramas a partir de los cuales se pueden obtener los valores de campo magnético. Un ionograma es una representación gráfica que según un código de colores se representa la intensidad del eco recibido en la antena frente a la frecuencia (f) y el retraso temporal (Δt) (Figura 2-4).

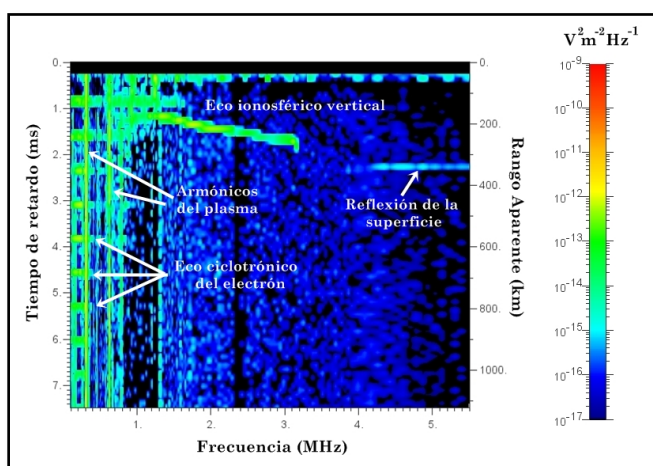


Figura 2-4. Ionograma 156 de la órbita 3151 de la misión MEX, en la parte nocturna de Marte. Registrado el 23-06-2006 a las 23:40:32.623 (SZA= 46.65°, z= 310 km).

La (Figura 2-4) muestra un ionograma marciano, en el eje vertical se representa el retraso temporal mientras que en el eje horizontal aparecen las frecuencias. En él se identifican la traza del eco ionosférico (línea horizontal verde), la reflexión de la superficie (línea horizontal azul claro), los armónicos del plasma (conjunto de líneas verticales verdes) y los ecos correspondientes al movimiento ciclotrónico del electrón (conjunto de líneas horizontales verdes a bajas frecuencias). Este tipo de representaciones proporcionan una gran variedad de información, desde el eco vertical ionosférico hasta la reflexión de la superficie del planeta. Sin embargo para el objetivo de esta Tesis los más relevantes son los horizontales, ya que a partir de estos se obtienen los valores de campo magnético. Las líneas horizontales de la Figura 2-4 corresponden con los ecos de

los electrones ciclotrónicos al aproximarse a la antenna emisora. El registro de estos ecos se describe en la (Figura 2-5), donde se muestra la aceleración de los electrones por la presencia del intenso campo eléctrico de la antenna. Esto se debe a que cuando la antenna emite pulsos a bajas frecuencias (típicamente por debajo de 2 MHz) los electrones se mueven más lejos de la antenna durante el semiciclo negativo, sin embargo no pueden seguir alejándose durante el siguiente semiciclo positivo y vuelven a ser atraídos hacia la antenna chocando contra ésta (Akalin et al., 2010).

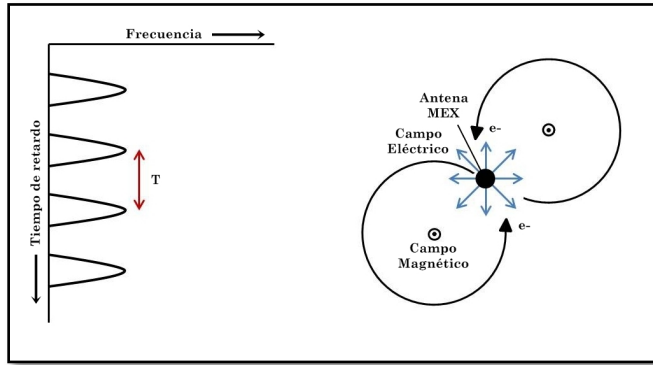


Figura 2-5. A la izquierda, esquema de los ecos horizontales identificable en un ionograma, debidos al movimiento ciclotrónico de los electrones. A la derecha se representa el mecanismo de generación del movimiento ciclotrónico de los electrones. Los pulsos de alta intensidad emitidos por la antenna del instrumento MARSIS permiten la aceleración de los electrones que se encuentran en su entorno más próximo. De este modo los electrones, que estaban en fase de escape de la antenna se sienten atraídos de nuevo hacia la misma describiendo un movimiento ciclotrónico.

A partir de las frecuencias ciclotrónicas de los electrones y de los ecos horizontales de los ionogramas se obtienen los valores de campo magnético a la altura de la nave. Para obtener dichos valores se ha partido de las conocidas expresiones de la fuerza magnética de Lorentz (2.1) y de la segunda ley de Newton (2.2)

$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha) \quad 2.1$$

donde q y v son la carga y la velocidad del electrón respectivamente, B es el módulo de campo magnético y α es el ángulo formado entre la velocidad del electrón y el campo magnético.

$$F_N = m \frac{v^2}{r} \quad 2.2$$

En la cual m es la masa del electrón y r y v corresponden con los módulos de la posición y de la velocidad del electrón respectivamente.

Igualando ambas expresiones y despejando el valor de la posición del electrón se obtiene

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B \cdot \sin(\alpha)} \quad 2.3$$

Haciendo uso de la relación que existe entre la velocidad angular y lineal de una partícula y entre la velocidad angular y el periodo (tiempo que tarda en chocar un electrón con la antena describiendo un movimiento circular) es posible llegar a la siguiente relación

$$\left. \begin{array}{l} v = w \cdot r \\ w = \frac{2\pi}{T} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{v}{r} = \frac{2\pi}{T} \quad 2.4$$

Sustituyendo la ecuación (2.3) en la (2.4), y despejando el módulo de campo magnético se obtiene:

$$B = \frac{m}{q \cdot \sin(\alpha)} \frac{2\pi}{T} \quad 2.5$$

A partir de esta expresión (2.5) se calculan los valores del módulo del campo magnético medido a la altura de la nave. Gracias a la obtención de estos datos varios autores como Akalin et al. (2010) y Gurnett et al. (2007), han podido proporcionar una idea de la distribución del campo magnético a altitudes comprendidas entre los $\sim(250-1400)$ km. A pesar de que los valores obtenidos corresponden al módulo de campo magnético, Akalin et al. (2010) presentó un trabajo a partir del cual se estimaba los valores vectoriales del campo.

En la Sección 5.2.1 se presentarán los resultados obtenidos a partir de la teoría explicada en esta Sección.

2.3. Modelos

A lo largo de esta sección se hará un repaso de las diferentes técnicas de modelización que se han empleado, hasta la fecha, para reproducir el campo magnético marciano.

2.3.1. Modelos basados en fuentes equivalentes

Dado que en algunas regiones de Marte la corteza se caracteriza por una intensa magnetización (Acuña et al., 1998) resulta sencillo imaginarse que mucho tiempo atrás, en Marte, debió existir una dinamo activa (Acuña et al., 1999). Sin embargo lo que no resulta tan sencillo de esclarecer es si las firmas magnéticas detectables en la corteza se adquirieron por procesos de magnetización termorremanente, química... tal y como se ha señalado por autores como Acuña et al. (1998).

La interpretación del campo magnético se basa en la aplicación de la teoría de potencial y el estudio de las funciones armónicas que son solución de la ecuación de Laplace. Los teoremas de unicidad de las funciones armónicas aseguran que el potencial queda unívocamente determinado en una región regular cerrada por los valores en el límite de la región (Kellogg, 1929). También puede darse el caso de que si se conocen el potencial y la primera derivada de una superficie arbitraria quedará determinado unívocamente en el espacio tridimensional para cualquier punto de dicha superficie (Connerney et al., 2003).

A pesar de todo ello, por lo general, dada una fuente que se encuentra a una cierta distancia del observador, siempre es posible encontrar otra fuente alternativa más próxima al punto de observación con la que se puede obtener con cualquier precisión el campo de la fuente más lejana. De entre todas las posibles fuentes que se pueden proponer hay que tener en cuenta que algunas de éstas no generan campo magnético alguno, como es el caso de una lámina infinita uniformemente magnetizada (Blakely, 1995).

En general, una de las mejores maneras para tratar la magnetización de la corteza de forma local es mediante la utilización de modelos de fuentes. De esta forma se buscan equivalencias entre diferentes volúmenes magnetizados uniformemente y se comparan con los observables. Una de las ventajas de dichos modelos es la posibilidad de introducir restricciones basadas en otro tipo de conocimientos relacionados con la fuente: materiales, dirección de la magnetización, localización de la misma... pero también, que no tengan que ver directamente con la misma, como por ejemplo: geología del entorno de la fuente, gravedad, presión...

Tal y como se ha descrito en la subsección anterior, los datos disponibles en Marte se adquirieron principalmente a 400 km de altura, aunque se puede disponer de algunos de ellos a una altitud en torno a 100 km cuando la MGS se encontraba en su fase de aerofrenado. Es cierto que resulta complicado imaginar una única fuente uniformemente magnetizada capaz de reproducir los datos registrados. Sin embargo, desde un punto de vista local, es posible encontrar fuentes individuales o configuraciones simples de las mismas capaz de reproducirlas. En cualquier caso, hay que tener en cuenta la posibilidad de que varias fuentes generen parcial o totalmente un mismo campo. Un ejemplo de ello lo encontramos en el caso de una esfera y de un cilindro horizontal infinito uniformemente magnetizados que se encuentran a una misma distancia de la superficie (d). Representando las componentes del campo magnético en el plano (x, z) para las fuentes mencionadas, es evidente comprobar cómo ambas configuraciones generan campos magnéticos muy similares.

Sin embargo, a pesar de la misma forma existen diferencias entre ambos. En el caso de la esfera la componente B_x tiene un crecimiento menor que en caso del cilindro así como un decaimiento más suave según nos alejamos de la fuente (Figura 2-6). Desde un punto de vista ideal, en ambos casos, la profundidad de la fuente puede determinarse a partir de la distancia entre dos picos consecutivos.

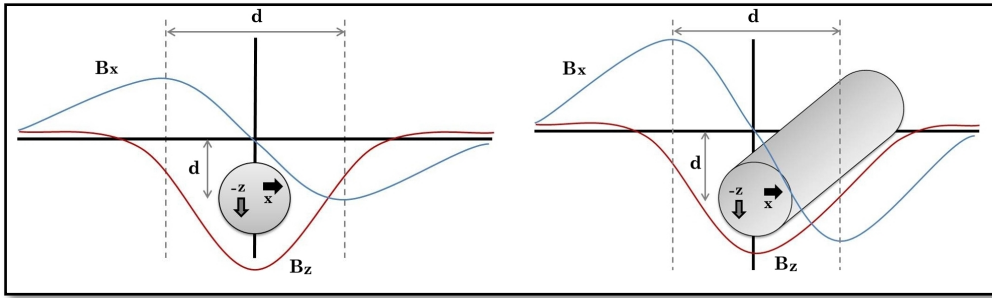


Figura 2-6. Recreaciones de las componentes características del campo magnético para una esfera (izquierda) y para un cilindro (derecha), que se encuentran a una cierta profundidad, d , de la superficie. En azul se muestra la componente x , y en rojo la componente z de la intensidad de campo magnético.

Existen fuentes uniformemente magnetizadas igualmente simples capaces de generar distribuciones de campo magnético que reproducen los datos obtenidos. En el caso de una placa delgada (cuyo espesor sea menor que la profundidad a la que se encuentre) el campo magnético generado en la componente horizontal fluctúa mucho más que en los casos de la esfera y del cilindro y su decaimiento es mucho más pronunciado a medida que la distancia respecto de la fuente aumenta **Figura 2-7**.

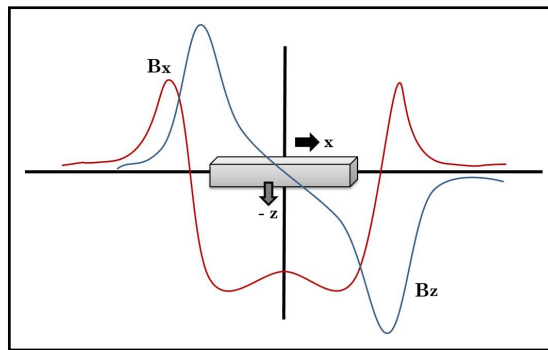


Figura 2-7. Componentes del campo magnético generado por una placa delgada. En azul se muestra la componente x , y en rojo la componente z de la intensidad de campo magnético.

A lo largo de la literatura es posible encontrar diferentes modelos basados en fuentes uniformemente magnetizadas. Un ejemplo de ello lo encontramos en el trabajo desarrollado por Purucker et al. (2000) en el que se consideró una red de dipolos verticales respecto de la superficie marciana. A partir de dicha distribución, se estimó el valor de los momentos magnéticos ajustando la componente radial asociada al campo magnético con la componente radial de los datos. Bajo estas condiciones se presentó un mapa de la componente radial del campo magnético a una altitud de 200 km. Para este cálculo se utilizó una separación de 111 km entre dipolos con el objetivo de reducir la inestabilidad de los resultados, lo cual ocurre cuando la distancia entre los dipolos es menor que la altura de observación (Mayhew, 1979).

Otro ejemplo del uso de este tipo de fuentes lo encontramos en el trabajo descrito por Connerney et al. (2003). El estudio se centra en los datos registrados por la misión MGS en su paso por Terra Cimmera y Terra Sirenum. El modelo propuesto consiste en veinte placas uniformemente magnetizadas con un espesor de 30 km cada una, y 200 km de anchura, extendiéndose en la dirección este-oeste. La orientación de la magnetización de cada placa varía en cada una de ellas, siendo en todas lineal y con valores de $+20 \text{ Am}^{-1}$ a -20 Am^{-1} . Los resultados de esta configuración se discuten en detalle a partir de la Figura 6 del artículo de Connerney et al. (2003). Analizando esta figura queda de manifiesto la casi perfecta correlación entre los datos y el modelo, que reproduce desde las variaciones hasta las intensidades a diferentes alturas. Sin embargo es posible encontrar algunas diferencias entre ambos.

2.3.2. Modelos basados en armónicos esféricos

Además de los modelos basados en fuentes existen otro tipo de modelos basados en el desarrollo del potencial en armónicos esféricos los cuales permiten realizar modelizaciones a nivel global. En el caso de la Tierra, en general, las observaciones se ponderan como el cuadrado de la inversa de la distribución de los residuales, ajustándose a una Gaussiana. Sin embargo, debido a las variaciones temporales y a otros factores, es bien conocido que las estimaciones de los errores estándar de las observaciones no son útiles para obtener un modelo realista y fiable. El hecho de utilizar una Gaussiana para los valores fuera de la distribución para la ponderación relativa, ha demostrado ser un

método más eficaz para alcanzar un mínimo de varianza. La metodología más aceptada pondera los datos individualmente por la inversa del cuadrado de los mismos, los cuales se multiplican por un factor empleado para la normalización del área (Schmitz and Cain, 1983).

En este tipo de modelos se calcula el potencial magnético origen interno de forma directa a partir de las medidas de las tres componentes del vector campo. El potencial magnético V en armónicos esféricos se expresa como:

$$V(r, \theta, \phi) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+l} \left(g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi) \right) P_n^m(\cos(\theta)) \quad 2.6$$

donde a es el radio de referencia de la superficie esférica, r, θ y ϕ corresponden en coordenadas esféricas a la distancia, la colatitud y la longitud (hacia el este) respectivamente. $P_n^m(\cos(\theta))$ es la función de Schmidt cuasi normalizada asociada a la función de Legendre de grado n y orden m . Por último g_{nm} y h_{nm} representan los coeficientes armónicos esféricos del potencial. En dicha ecuación (2.6) N indica el máximo grado armónico.

A partir de la ecuación (2.6), el vector campo magnético \vec{F} se relaciona con el potencial siguiendo $\vec{F} = -\nabla \vec{V}$.

En la mayoría de los modelos basado en armónicos esféricos se consideran B_r , B_θ y B_ϕ como las componentes del campo magnético observadas (datos) mientras que F_r , F_θ y F_ϕ corresponden con los valores de campo obtenidos por el modelo en un cierto punto del espacio. A partir de estas consideraciones se calculan los coeficientes de los armónicos esféricos del modelo minimizando ϵ^2 , que viene definido por la siguiente expresión

$$\epsilon^2 = \sum_l \left[\left(B_r - F_r \right)_l^2 + \alpha \left(B_\theta - F_\theta \right)_l^2 + \beta \left(B_\phi - F_\phi \right)_l^2 \right] \cdot W_l \quad 2.7$$

donde W_l es el factor de ponderación para el dato *lésimo*, α y β corresponden con los factores multiplicativos que proporcionan información de la contribución

de los observables Norte-Sur, Este-Oeste de las componentes al modelo. El parámetro l indica que el sumatorio se aplica a todos los puntos de observación.

Parte de esta metodología se emplea en dos de los modelos más aceptados hasta la fecha para la modelización del campo magnético marciano. Uno de estos es el presentado por Arkani-Hamed. (2001a) en el que presenta un modelo en armónicos esféricos de grado 50. En dicho trabajo se modela el campo de potencial magnético a 120 km de altitud, a partir de los datos de campo magnético adquiridos por la MGS. Dicho modelo trabaja sobre las tres componentes ortogonales del campo: Radial, Oeste-Este y Norte-Sur en dirección a la superficie marciana. A partir de los resultados obtenidos se pudo establecer un límite superior para la magnetización de ~ 2 A/m para la parte superior de la corteza, siempre y cuando se esté alejado de las zonas con fuertes anomalías magnéticas (Arkani-Hamed, 2001a).

El modelo de Cain et al. (2003) genera una función potencial la cual reduce el desajuste entre los datos y el modelo en un factor de aproximadamente 5, respecto de los resultados proporcionados por los modelos previos. Para lograr dicho objetivo y poder reproducir las estructuras de menor escala, el nivel de expansión de los armónicos esféricos se ha tenido que incrementar hasta $n = 90$. Con dicho modelo se puede conocer las tres componentes del campo magnético en coordenadas Cartesianas y a partir del mismo, el módulo para cualquier altura. De esta forma se pueden comparar los valores obtenidos con los valores medidos in situ, y tener una idea de las contribuciones del campo magnético cortical, al igual que compararlos con los valores indirectos.

Con el objetivo de poder trabajar de una forma eficaz con los modelos existentes hasta la fecha, la Universidad de California (Space Physics Research group, Berkeley) ha desarrollado un código en IDL (Interactive Data Language) a partir del cual se obtienen los valores de campo magnético de interés. Este código puede encontrarse en la página <http://sprg.ssl.berkeley.edu/~brain/crustalidl.html>.

A lo largo de esta Tesis se ha trabajado con este código para calcular las componentes del campo magnético (B_x, B_y, B_z) así como el módulo a partir de las hipótesis de Cain et al. (2003).

CAPÍTULO

3

CAMPO ELÉCTRICO DE MARTE

En esta Tesis no sólo se ha trabajado con partículas cargadas eléctricamente sino también con partículas de polvo marciano ya que, como veremos a lo largo de este capítulo, son imprescindibles para que se produzca otro de los fenómenos más importantes en Marte: el campo eléctrico.

El polvo marciano se extiende a lo largo de la superficie de todo el planeta jugando un papel fundamental, entre otros, en el clima del mismo. Este papel viene marcado por la interacción entre el polvo, la atmósfera y la radiación solar (IPCC, 2007). Además, el polvo juega un papel fundamental en el daño o mal funcionamiento de los instrumentos ópticos, en las partes mecánicas de los mismos ... (Applebaum et al., 1993; Landis and Jenkins, 2000).

En cuanto a la relevancia del polvo en Marte, estudios recientes realizados en la Tierra, han demostrado cómo los procesos de “*saltation*” y de interacción entre las partículas de polvo pueden verse altamente electrizados alcanzando valores de campos eléctricos superiores a 100 kV/m (Stow, 1969; Schmidt et al., 1998; Renno et al., 2004; Renno and Kok, 2007; Jackson and Farrell., 2006; Kok and Renno, 2006, 2008). Además se ha podido confirmar la existencia de campos eléctricos generados por tormentas de polvo en Marte, los cuales originan descargas eléctricas (Eden and Vonnegut, 1973; Melnik and Parrot, 1998; Krauss et al., 2006; Farrell et al., 2003, 2006a; Zhai et al., 2006; Kok and Renno, 2008). Por ello, la existencia de grandes campos eléctricos, así como de descargas eléctricas asociadas, tiene grandes e importantes implicaciones en la química atmosférica marciana, la exploración humana, la habitabilidad, etc, (Atreya et al., 2006; Delory et al., 2006).

Hasta la fecha existen numerosos experimentos y medidas realizadas en laboratorios así como en campañas realizadas en la Tierra, que han proporcionado valores de campo eléctrico elevados asociados a *dust devils*, y a tormentas de polvo (Schmidt et al., 1998; Freier, 1960). Todos estos resultados se pueden extrapolar al caso de Marte, por analogía.

3.1. Polvo atmosférico marciano

3.1.1. Polvo

Los procesos eólicos son los responsables de la elevación del polvo de la superficie marciana, sin embargo la física que se encuentra detrás de dicho fenómeno no está perfectamente determinada. Es conocido que la atmósfera terrestre contiene una gran cantidad de polvo y vapor de agua en suspensión. Dicho polvo está presente permanentemente en la atmósfera aunque en abundancia variable. En Marte la situación es similar respecto del polvo, resultando que el polvo aerotransportado afecta directamente al clima, influenciando térmicamente la troposfera y la evolución termodinámica y dinámica de la atmósfera. La mayor parte de los valores y características que se conocen de la distribución del tamaño de las partículas de polvo se han obtenido a partir de medidas ópticas (Farrell et al., 2004). Por lo general, el comportamiento del polvo marciano se puede clasificar según el diámetro (θ) de los granos que lo formen en tres categorías

- ∞ Si $\theta \sim 100 \mu\text{m} \rightarrow$ se encuentran en movimiento arrastrándose
- ∞ $10 \mu\text{m} < \theta < 100 \mu\text{m} \rightarrow$ se encuentran en *saltation*
- ∞ $1 \mu\text{m} < \theta < 10 \mu\text{m} \rightarrow$ se encuentran en suspensión

Los experimentos realizados en el túnel de viento (Greeley et al., 1980, 1981) mostraron que las partículas de $\theta \sim 100 \mu\text{m}$ se mueven con mayor facilidad en forma de arrastre por los esfuerzos de cizalla de los vientos horizontales. Las partículas más pequeñas son aerodinámicamente menos resistentes principalmente por las fuerzas propias que se generan entre las mismas (Bagnold, 1941; Iversen, 1976). Existe otro régimen, *saltation*, en el que partículas con diámetros entre (10-100) μm pueden ser transportadas por la acción del viento dando “pequeños saltos” por la superficie. Por último, si el diámetro de las partículas es menor de 10 μm las partículas se encuentran generalmente en estado de suspensión.

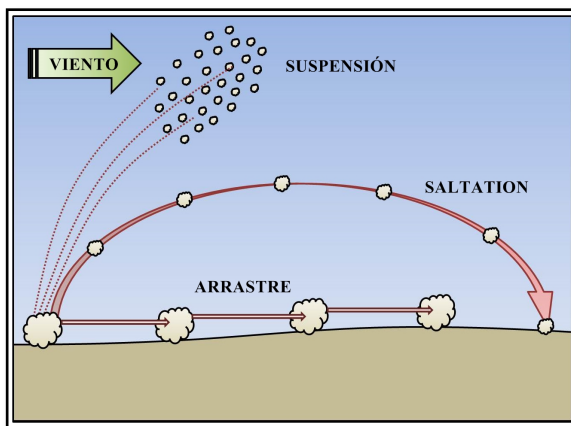


Figura 3-1. Visión esquematizada de los diferentes procesos transporte por los que las partículas de polvo y arena se ven afectados.

En la **Figura 3-1** se muestran los diferentes efectos del viento sobre las partículas de polvo marciano en función de su tamaño además del régimen en el que se encuentran. Cada uno de los regímenes de transporte presentados depende fuertemente de las características del viento, de las velocidades de las partículas, así como de las fuerzas gravitatorias. A partir de estos mecanismos de transporte el polvo marciano, así como la arena de la superficie, recorren grandes distancias jugando un papel fundamental en la dinámica de la atmósfera así como en el clima del planeta. El movimiento del polvo y la arena de la superficie marciana generan, por la acción del viento, dunas, tormentas de polvo a nivel local o global, *dust devils*, etc. (Martin and Zurek, 1993; Fisher et al., 2005).

A partir de los datos del espectro infrarrojo, se obtuvo información sobre la composición y distribución del polvo de la superficie marciana analizado por la misión Mariner 9 (1971-1972). Los resultados llevaron a concluir que en la composición intervienen varios minerales, es decir, se trata de una mezcla de materiales dominados fundamentalmente por silicatos ígneos con más del 60 % de SiO_2 .

3.1.2. *Dust devils* y tormentas de polvo

El mecanismo de formación de los *dust devils* en Marte es similar al que se ha determinado para la Tierra a partir de estudios realizados en laboratorios así como en diferentes campañas en desiertos. Los *dust devils* se generan cuando la energía solar calienta la superficie del planeta generándose una capa de aire caliente justo por encima de la misma. Puesto que el aire caliente es menos denso que la atmósfera más fría que hay por encima, se eleva formando un remolino que arrastra el polvo del suelo, transportándolo con él y generando lo que se conoce como *dust devil*.

Las interacciones entre el viento, radiación solar, y polvo se dan de forma constante a lo largo de todo el planeta. A pequeñas escalas, los *dust devils* pueden interpretarse como vórtices convectivos con un núcleo cálido que alcanzan dimensiones entre 100 m y 1 km de anchura, y (10-15) km de altura, los cuales ocurren prácticamente a diario en diferentes regiones a lo largo del planeta (Thomas and Gierasch, 1985; Edgett and Malin, 2000; Cantor et al., 2002). En la Tierra, se han podido hacer medidas aisladas de las propiedades eléctricas de los *dust devils* terrestres (Farrell et al., 2000), y se encontró que para *dust devils* de unos 10 metros de ancho y entre 100 m y 200 m de alto, se pueden generar grandes campos eléctricos (DC) que pueden superar los cientos de V/m. Los *dust devils* terrestres están formados por vientos ciclostróficos con velocidades comprendidas entre 10 m/s y 30 m/s. Además, la temperatura en el centro del *dust devil* suele estar a unos cuatro grados por encima de la temperatura ambiente, mientras que su presión en esa misma zona está a unos pocos milibares por debajo de la presión ambiente

Las simulaciones de Melnik and Parrot. (1998) para el caso de Marte, indican que se necesitan tres procesos para que se generen momentos dipolares eléctricos a gran escala:

- ∞ Mezcla de granos
- ∞ Procesos eléctricos por contacto, que dependen de la masa
- ∞ Vientos verticales que dan lugar a una estratificación de los granos por sus masas por la acción del campo gravitacional.

Para escalas espaciales mayores se aprecian dependencias estacionales a nivel local y regional de las tormentas de polvo, cubriendo áreas que van desde los $\sim 10^4$ km² hasta escalas globales (Martin and Zurek, 1993). Las tormentas de polvo a nivel global ocurren en Marte cada 2 ó 3 años marcianos afectando al planeta durante varios meses. Se han realizado mediciones del polvo durante dichas tormentas, y se ha observado que alcanzas alturas de ~ 50 km. La formación y la evolución de las tormentas de polvo es un proceso dinámicos y que se pueden describir a partir del siguiente esquema:

- ∞ Los granos cercanos a la superficie, así como los granos de polvo, absorben el calor procedente del Sol.
- ∞ Este hecho genera gradientes en la superficie tanto de presión como de temperatura.
- ∞ Este proceso origina la formación de vientos verticales o vórtices locales.
- ∞ En este momento los granos de polvo empiezan a elevarse desde la superficie.
- ∞ Como los granos de polvo están en movimiento entran en contacto tanto con la superficie, como con otros granos de polvo, lo cual provoca un intercambio de carga siguiendo un proceso triboeléctrico.
- ∞ Las tormentas de polvo impulsadas por convección describen un proceso de estratificación de masas: los granos pequeños con carga negativas se sitúan sobre los más pesados que, además, están cargados positivamente.
- ∞ Este hecho lleva a una separación de las cargas debido a la gravedad y a la viscosidad del aire.

3.1.3. Procesos de electrización

Desde un punto de vista físico es bien conocido que dos objetos quedan cargados cuando se friccionan mutuamente (procesos de carga triboeléctricos). La transferencia de carga depende de la diferencia de potencial de contacto entre los materiales de cada objeto (Harper, 1967; Desch and Cuzzi, 2000). Los procesos de carga del polvo se puede producir por colisiones entre granos de arena y el polvo o entre las partículas en *saltation* y la superficie del planeta (Figura 3-2), (Renno et al., 2003; Kok and Renno, 2008).

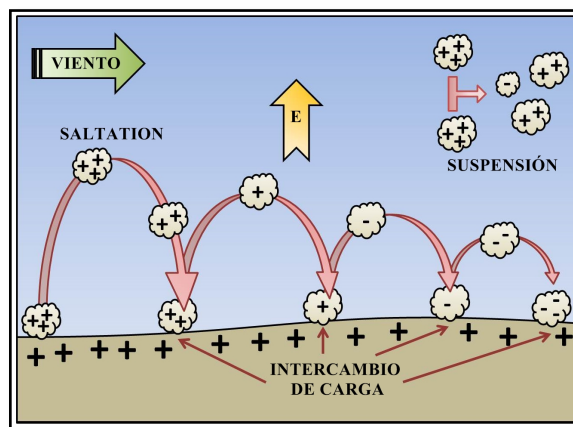


Figura 3-2. Esquema de los dos principales procesos de intercambio de carga que ocurren mediante procesos triboeléctricos (fricción) entre el polvo y la arena con la superficie y entre las propias partículas (polvo-arena, polvo-polvo ó arena-arena).

En la **Figura 3-2** se han representado los procesos de electrización que se pueden generar por la acción del viento sobre la arena y el polvo (Harper, 1967). En ella se observa cómo las partículas que se encuentran en estado de *saltation* inicialmente cargadas positivamente, van perdiendo dicha carga hasta convertirse en negativas por las sucesivas colisiones con la superficie que está cargada positivamente. Esto se debe a que si asumimos que la superficie del planeta se puede aproximar a una partícula infinitamente larga, se espera que esté cargada positivamente respecto a las partículas que se encuentran en régimen de *saltation* (Kok and Renno, 2008). Esta hipótesis se ha podido confirmar a partir de las medidas de la dirección del campo eléctrico realizadas cerca de la superficie, ya que se orienta de forma ascendente desde la superficie (Schmidt et al., 1998; Zheng et al., 2003; Qu et al., 2004). Así mismo, cuando el intercambio de carga se produce entre partículas que se encuentran en suspensión, existe a su vez una transferencia de carga entre las partículas en contacto. Sin embargo, el mecanismo físico que gobierna las transferencias de carga mencionadas no está del todo claro, aunque a partir de mediciones en laboratorios y con experimentos realizados en la Tierra, se puede concluir que en general las partículas más grandes se quedan cargadas positivamente

respecto de las partículas más pequeñas (Freier, 1960; Schmidt et al., 1998; Inculet et al., 2006; Duff and Lacks, 2008).

Además de los procesos descritos, los *dust devils* y las tormentas de polvo locales o globales producen, igualmente, separaciones de cargas (Figura 3-3) por las fricciones existentes entre las partículas de polvo que se encuentran en *saltation*, así como por los intercambios entre el polvo y la superficie.

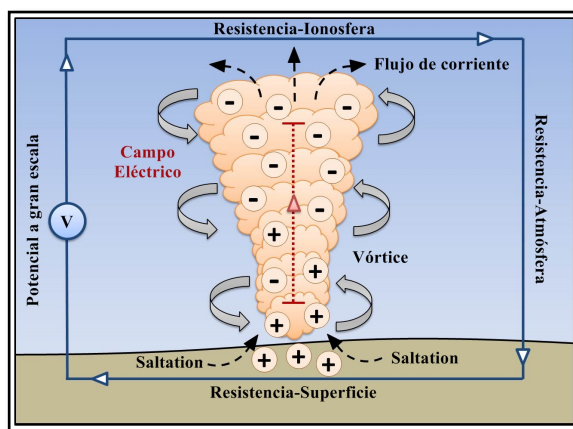


Figura 3-3. Visión esquematizada del proceso de intercambio de cargas que ocurre en el interior de un *dust devil* así como del campo eléctrico derivado de la separación de cargas.

En la Figura 3-3 se ha esquematizado el proceso de intercambio de carga que ocurre en el interior de un *dust devil* observando cómo, tras los intercambios de carga, éstas quedan separadas, ubicándose las cargas positivas más próximas a la superficie mientras que las negativas se sitúan en las zonas más altas del *dust devil*. Esta separación de cargas se produce principalmente por la estratificación de los granos de polvo, pudiéndose aproximar a un condensador que produce un campo eléctrico. Este fenómeno no ocurre únicamente en los *dust devils* sino que se obtienen los mismos resultados en los casos de las tormentas de polvo.

A partir de todos los procesos descritos en esta Sección, estudios recientes realizados en la Tierra han permitido obtener campos eléctricos del orden de kV/m para *dust devils* de unos ~ 100 m de altura (Freier, 1960; Crozier, 1964, 1970; Delory et al., 2006). Para el caso de Marte, y gracias a estudios más

recientes, se han obtenido valores de campos eléctrico para *dust devils* entre ~ 3 kV/m y 20 kV/m (Farrell et al., 2003, 2004; Renno et al., 2004).

3.2. Modelos

Dada la posibilidad de establecer una correlación entre los fenómenos estudiados en la Tierra (in situ), con los que se han observado en Marte a partir de datos y de las imágenes de los rovers, se han desarrollado diferentes aproximaciones y teorías con el objetivo de entender en mayor profundidad la formación de estos procesos. A lo largo de esta Tesis se ha trabajado con la aproximación descrita en los trabajos de Farrell et al. (2003, 2006a) en que el modelo electrostático puede definirse como el acoplamiento entre un modelo eléctrico y otro de fluidos. En este sentido el objetivo consiste en resolver el desarrollo del campo eléctrico generado en el interior de un *dust devil* basado únicamente en transportes de carga verticales (Mathpal et al., 1980; Kuettner et al., 1981; Volland, 1984; Farrell et al., 2003), como por ejemplo los flujos de corriente. Al igual que en el caso terrestre, se han asumido dos poblaciones de partículas: granos de polvo grandes (L) que se encuentren en estado de *saltation*, influenciados por la acción de la gravedad, y granos de polvo pequeños (S) bajo la influencia del viento arrastrados por el fluido. Si bien la distribución de partículas se ajusta a una función de tipo Gaussiano, esta división de partículas en función de su radio muestra una clara delineación del tipo de las mismas.

Desde un punto de vista general, la descripción de campo eléctrico, E , que se genera en el interior de un *dust devil* puede obtenerse a partir de la ecuación de continuidad:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{J}{\epsilon_0} \quad 3.1$$

donde ϵ_0 es el valor de la permitividad en el vacío y J la densidad de corriente que puede expresarse como

$$J = n_L Q_L v_L + n_S Q_S v_S + \sigma E \quad 3.2$$

para la que $n_{L,S}$ corresponde con las densidades de las partículas grandes y pequeñas, respectivamente, $Q_{L,S}$ son la carga para las partículas grandes y pequeñas, $v_{L,S}$ las velocidades correspondientes a las partículas y σ la conductividad atmosférica local. En la ecuación (3.2), el término σE representa la corriente de disipación en la atmósfera. En este punto, se asume que la carga neta en el interior del *dust devil* tiene un valor neto de cero, por lo que $n_L Q_L = -n_S Q_S$. Bajo dichas hipótesis, la expresión (3.2) pasa a escribirse

$$J = n_L Q_L (v_L - v_S) = n_L Q_L \Delta v \quad 3.3$$

En cuanto a las velocidades de las partículas, se ha considerado que las más pequeñas se mueven a una velocidad mayor que las más grandes, por lo que se obtiene que $\Delta v < 0$. Sustituyendo la expresión (3.3) en la ecuación de continuidad propuesta (3.1) y tomando derivadas respecto del tiempo de la expresión resultante se puede escribir que la evolución temporal del campo eléctrico viene dada por

$$\frac{d^2 E}{dt^2} + \sigma \frac{dE}{dt} = \frac{-n_L \Delta v}{\epsilon_0} \frac{dQ_L}{dt} \quad 3.4$$

Tal y como se ha comentado en las Secciones anteriores, se han considerado los procesos triboeléctricos como los responsables de los intercambios de cargas entre las partículas. Para simular dicho efecto Melnik and Parrot. (1998) asumieron que después de la colisión entre dos granos de diferentes tamaños, el más ligero adquiere una carga negativa del orden de fC por cada micrómetro del radio, mientras que la más pesada adquiere la misma carga pero de signo contrario.

Por otra parte, dado que la capacidad de carga de un grano esférico varía directamente con el radio del mismo r , la tasa de variación de la carga para las partículas grandes viene dada por

$$\frac{dQ_L}{dt} = \nu \cdot \Delta q \quad 3.5$$

donde ν es la frecuencia de colisión entre los granos grandes y pequeños que viene dada por $\nu = \pi r_L^2 \Delta v \cdot n_s$. Por su parte, Δq representa el intercambio de carga por colisión que viene definido en función del tamaño de las partículas así como de su composición según lo descrito por Desch and Cuzzi. (2000) del siguiente modo:

$$\Delta q \approx 2668 \left(\frac{\Delta \phi}{2V} \right) \left(\frac{r_f}{0.5 \mu m} \right) \cdot e \quad 3.6$$

siendo $\Delta \phi$ la diferencia entre los potenciales triboeléctricos superficiales de las partículas que entran en contacto, r_f el radio reducido que viene definido por

$r_f = (r_L^{-1} + r_S^{-1})^{-1} \approx r_S$, donde $r_{L,S}$ son los radios de los granos grandes y pequeños respectivamente y e la carga elemental del electrón.

Tal y como se ha descrito anteriormente en la Subsección 3.1.3, para la formación de un *dust devil* son fundamentales, entre otras cosas, vientos del tipo vórtice. En el caso de estudio, se ha seleccionado un vórtice vertical de gradiente de presión negativo. Teniendo en cuenta este aspecto, las partículas más ligeras bajo la acción de vientos de este tipo pueden producir desplazamientos horizontales, los cuales no serán tenidos en cuenta en este modelo. Por este motivo, tan sólo se van a contemplar las fuerzas ejercidas por vientos de carácter vertical lo suficientemente grandes como para superar el coeficiente de arrastre y elevar los granos de la superficie. De este modo la fuerza del viento ejercida sobre el grano viene definida por

$$F_w = \pi r^2 \rho_a (W - v)^2 \quad 3.7$$

donde W es la velocidad del viento y ρ_a la densidad atmosférica. Para los valores de las velocidades de los granos que colisionan se ha seguido lo descrito por Farrell et al. (2006a) y se han recalculado de nuevo.

Desde un punto de vista simplificado, el balance de fuerzas que actúan sobre los granos de polvo viene descrito por la ecuación de Newton según

$$m_{L,S} \frac{dv_{L,S}}{dt} = F_g + F_w \quad 3.8$$

siendo F_g la fuerza de la gravedad de signo negativo dirigido hacia la superficie.

Para cada una de las poblaciones de partículas planteadas las correspondientes ecuaciones de movimiento vienen descritas por:

$$\frac{dv_L}{dt} = -g + \frac{\pi \cdot r_L^2 \cdot \rho_a (W - v_L)^2}{m_L} \quad 3.9$$

y

$$\frac{dv_S}{dt} = -g + \frac{\pi \cdot r_S^2 \cdot \rho_a (W - v_S)^2}{m_S} \quad 3.10$$

donde $m_{L,S}$ son los valores de masa para las partículas grandes y pequeñas respectivamente.

Resolviendo las ecuaciones diferenciales de primer orden planteadas (3.9 y 3.10) y a partir de las iteraciones de la solución inicial $v_{L,S} = 0$ para $t = 0$ se obtienen las siguientes expresiones para las velocidades de los granos

$$v_L = \frac{2a_L (-1 + \exp(w_L \cdot t))}{b_L (1 - \exp(w_L \cdot t) + w_L (1 + \exp(w_L \cdot t)))} \quad 3.11$$

y

$$v_s = \frac{2a_s \left(-1 + \exp(w_s \cdot t) \right)}{b_s \left(1 - \exp(w_s \cdot t) + w_s \left(1 + \exp(w_s \cdot t) \right) \right)} \quad 3.12$$

donde $a_{L,S} = -g + c_{L,S} W^2$, $b_{L,S} = -2c_{L,S} W$, $c_{L,S} = \frac{\pi \cdot r_{L,S}^2 \rho_a}{m_{L,S}}$ y $w_{L,S} = \sqrt{4gc_{L,S}}$. De este modo quedan perfectamente determinados los movimientos de ambas poblaciones de granos de polvo grandes y pequeños, dependiendo de la velocidad del viento así como de las propiedades características de los mismos.

A partir de estas ecuaciones y según lo propuesto por Farrell et al. (2003, 2006a) es posible obtener la evolución del campo eléctrico a partir de la ecuación (3.4) y empleando para ello las expresiones (3.11 y 3.12). Para resolverlo se emplea el método de Runge-Kutta de cuarto orden (Anexo I), el cual, lo forman un conjunto de métodos iterativos (implícitos y explícitos) para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales ordinarias, concretamente, el problema del valor inicial.

En el Capítulo 6 se presentará un estudio detallado de la evolución temporal del campo eléctrico en el interior de un *dust devil*. Para lo cual se presentará un nuevo método para su obtención además del mencionado en este capítulo.

CAPÍTULO

4

RESULTADOS I. TRAYECTORIAS DE LAS PARTÍCULAS

4.1. Descripción general

A lo largo de este Capítulo se va a tratar uno de los tres objetivos principales de esta tesis: entender y describir con detalle las trayectorias reproducidas por cargas eléctricas. Para ello en esta sección se ha realizado una introducción al problema, y una descripción de los estudios previos y del trabajo aportado a lo largo de esta investigación.

4.1.1. Introducción y estudios previos

El análisis de la interacción entre la magnetosfera y la radiación ha sido ampliamente estudiado tal y como se ha descrito en la Subsección 1.3.1. Dicho interés nace de la necesidad de explicar diferentes fenómenos geofísicos. En el caso de la Tierra estos estudios nacieron de la mano de Störmer en 1907 (Störmer, 1907) mientras buscaba una explicación para la naturaleza de las auroras polares estudiando el comportamiento de las partículas cargadas en el campo magnético terrestre. En 1958 a raíz del descubrimiento de los cinturones de radiación de Van Allen el conocimiento de las órbitas atrapadas en el campo magnético terrestre (Van Allen et al., 1958) cobró una mayor importancia. Más adelante Dragt. (1965) ahondó en el estudio del atrapamiento de las órbitas en un campo magnético dipolar, así como en la propuesta de modelos estocásticos con el objetivo de explicar la formación de la radiación de Van Allen alrededor de los planetas (Blanchard, 1984). Por otro lado surgieron nuevas propuestas de esquemas numéricos para estudiar la ecuación de movimiento de una partícula cargada en un campo magnético dipolar para tiempos grandes (Vázquez and Jiménez, 1988).

Estos estudios se han extrapolado a otros planetas como Júpiter (Mahjouri, 1997), pudiendo establecer ciertas analogías entre los procesos que ocurren en la Tierra y los que acontecen en otros planetas. Entre estos planetas se encuentran los estudios relacionados con el planeta rojo. Desde la llegada de las misiones a Marte se ha podido disponer de grandes volúmenes de datos para su estudio. Algunos de estos resultados están relacionados con el estudio de la precipitación de protones sobre Marte a partir de los datos proporcionados por

Mars Express (Diéval et al., 2012), así como el estudio de la precipitación y distribución de electrones en la atmósfera marciana (Halekas et al., 2007a).

Los estudios realizados sobre Marte han llevado a concluir que al no poseer Marte un campo magnético global carece a su vez de una magnetosfera para todo el planeta, tal y como ocurre en la Tierra (Vennerstrom, 2011). Sin embargo, existen evidencias tanto de la presencia de mini-magnetosferas ubicadas principalmente en el hemisferio sur (Ness et al., 2000; Nagy et al., 2004; Spreiter and Stahara, 1992; and Crider et al., 2004), coincidentes con las principales anomalías magnéticas, como de una magnetosfera inducida producto de la interacción entre el viento solar y la ionosfera marciana (Vignes et al., 2000 y Bertucci et al., 2005).

Por todo ello en este trabajo se presenta un nuevo esquema numérico en coordenadas Cartesianas capaz de reproducir los estados de atrapamiento de partículas cargadas eléctricamente cuando se encuentra en interacción directa con un campo magnético. Siempre teniendo en cuenta que el marco de estudio es el planeta Marte.

4.2. Revisión de la teoría de Störmer

Tal y como se describió en la Sección 2.1.1, Störmer. (1907) reveló la importancia del estudio del movimiento de las partículas cargadas en un campo magnético, ya que con su entendimiento sería posible dar explicación a numerosos problemas geofísicos, como el fenómeno de las auroras o de las “mini” magnetosferas marcianas. Es por ello que desarrolló una teoría que se basa en la aproximación dipolar del campo magnético y con la que consiguió describir las principales características del campo geomagnético (Störmer., 1907, 1931, M1955).

En esta Sección vamos a considerar partículas no relativistas en movimiento y vamos a calcular la barrera de energía necesaria para que un protón y un electrón puedan quedar atrapados en el pozo de potencial. Vamos a suponer que éstas partículas van a estar en movimiento en un campo magnético dipolar. Con el objetivo de simplificar las ecuaciones no relativistas de la

integral de la energía, utilizando coordenadas cilíndricas (ρ, z, φ) , ésta se puede escribir como

$$\dot{\rho}^2 + \dot{z}^2 + \dot{\varphi}^2 = cte \quad 4.1$$

Dado que el campo magnético es dipolar existe una simetría axial, lo cual implica una no dependencia de este campo con el azimut φ . Por ello la componente azimutal del momento es constante (4.2), ya que la variación del momento angular respecto del azimut es nula $\left(\frac{\partial \mathfrak{S}}{\partial \varphi} = 0\right)$.

$$p_{\varphi} = \frac{\partial \mathfrak{S}}{\partial \varphi} = m\rho^2\dot{\varphi} + \frac{e}{c}\rho A_{\varphi} = cte \quad 4.2$$

donde $A_{\varphi} = \frac{m\rho}{r^3}$, corresponde con la componente φ del potencial vector, m es la masa de la partícula, c es la velocidad de la luz, r la posición de la misma y e es la carga del electrón.

Por otra parte, la energía adimensional empleada por Störmer (Störmer, 1907) viene dada por el Hamiltoniano del siguiente modo:

$$H_s = \frac{I}{2}(\dot{\rho}_s^2 + \dot{z}_s^2) + V_s(\rho_s, z_s) \quad 4.3$$

donde el campo potencial V_s puede escribirse como

$$V_s(\rho, z) = \frac{I}{2} \left(\frac{1}{\rho_s} - \frac{\rho_s}{(\rho_s^2 + z_s^2)^{3/2}} \right)^2 \quad 4.4$$

A partir de esta expresión (4.4) se han representado los pozos de potencial de un electrón y un protón (**Figura 4-1**)

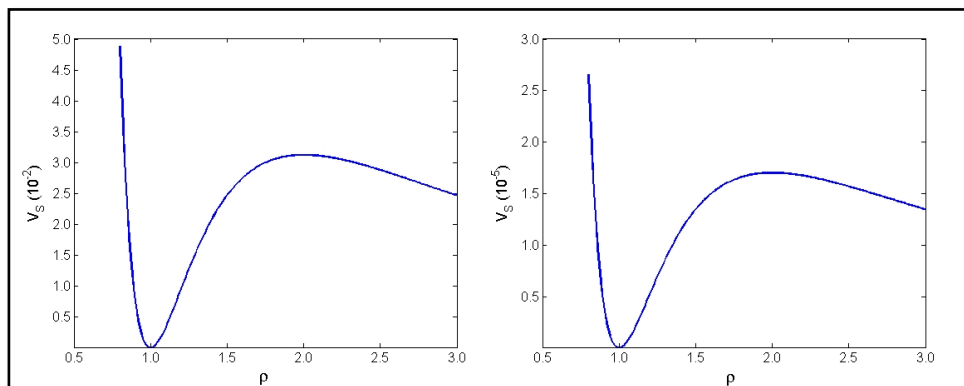


Figura 4-1. Pozos de potencial calculados a partir de la teoría de Störmer descrita para un electrón (izquierda) y un protón (derecha) utilizando la ecuación adimensional (4.4).

Considerando esta figura se ha establecido el umbral de energía a partir del cual una partícula queda atrapada en el pozo de potencial o no. Es decir, se ha determinado el umbral energético que tanto un electrón como un protón deben sobrepasar para escapar del pozo de potencial. Para valores inferiores al umbral, la partícula quedaría atrapada, mientras que si las energías son superiores a este umbral la partícula escapa. Teniendo en cuenta que estos valores corresponden a un sistema adimensional, en el caso de el electrón esta energía umbral alcanza un valor de $1/32$, mientras que para el protón es de $1/293772$ ($1.702 \cdot 10^{-5}$). Con estos valores y teniendo en cuenta que para ambos cálculos se han utilizado las mismas condiciones, la energía necesaria para escapar del pozo de potencial es mucho menor en el caso del protón que en el caso del electrón.

Sin embargo, uno de los objetivos de este trabajo consiste en calcular estos valores en sistema no adimensional. Para ello se ha trabajado con la teoría de Störmer mencionada, en coordenadas cilíndricas y utilizando para ello las unidades Gaussianas. De acuerdo con todas estas condiciones el campo potencial pasa a escribirse como

$$V(\rho, z) = \frac{I}{2m} \left(\frac{p_\varphi}{\rho} - \frac{e}{c} \frac{C_m m_z \rho}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} \right)^2 \quad 4.5$$

donde p_φ tiene un valor constante que depende de las condiciones iniciales del problema, C_m es un valor constante que depende de cada campo magnético (como se describirá en la Subsección 4.3.2) y m_z corresponde con la componente z del momento dipolar (Tabla 4-1).

Tabla 4-1. Resumen de los valores constantes en unidades Gaussianas (NOTA 1esu=1stattC=1g^{1/2}cm^{3/2}s⁻¹).

Parámetro	Valor
Carga del electrón (esu)	$4.8 \cdot 10^{-10}$
Carga del protón (esu)	$4.8 \cdot 10^{-10}$
Carga ⁴ He (esu)	$9.6 \cdot 10^{-10}$
Masa del electrón (g)	$9.1 \cdot 10^{-28}$
Masa del protón (g)	$1.7 \cdot 10^{-24}$
Masa ⁴ He (g)	$6.7 \cdot 10^{-24}$
Velocidad de la luz (cm ⁻¹)	$3.0 \cdot 10^{10}$
Esfera C_m (g · cm/esu ²)	$1.1 \cdot 10^{-21}$
Cilindro C_m (g · cm/esu ²)	$1.1 \cdot 10^{-19}$
Momento dipolar Marte (erg/G)	$2.6 \cdot 10^{19}$

Para caracterizar los pozos de potencial se han determinado el máximo y el mínimo de cada pozo. Para ello, a partir de la expresión (4.5) se ha calculado la derivada parcial respecto de ρ y se ha particularizado para $z = 0$.

$$\left. \frac{\partial V}{\partial \rho} \right|_{z=0} = \frac{I}{m} \left(\frac{p_\varphi}{\rho} - \frac{e}{c} \frac{C_m m_z \rho}{\rho^3} \right) \left(-\frac{p_\varphi}{\rho^2} + \frac{2eC_m m_z}{c\rho^3} \right) = 0 \quad 4.6$$

Operando y reagrupando los términos de la ecuación (4.6) obtenemos la siguiente expresión

$$-p_\varphi^2 \rho^2 + \frac{2e}{c} C_m m_z p_\varphi \rho + \frac{e}{c} C_m m_z p_\varphi \rho - 2 \frac{e^2}{c^2} C_m^2 m_z^2 = 0 \quad 4.7$$

De donde, despejando ρ

$$\rho = \frac{-\frac{3e}{c}C_m m_z p_\varphi \pm \frac{e}{c}C_m m_z p_\varphi}{-2p_\varphi^2} \quad 4.8$$

A partir de la expresión (4.8) se obtienen dos soluciones para la coordenada ρ (4.9). Una de estas soluciones corresponde con el mínimo, ρ_{min} , del pozo de potencial, mientras que la otra corresponde con el máximo del mismo, ρ_{max} .

$$\begin{aligned} \rho_{min} &= \frac{eC_m m_z}{cp_\varphi} \\ \rho_{max} &= \frac{2eC_m m_z}{cp_\varphi} \end{aligned} \quad 4.9$$

En la **Figura 4-2** se han representado los pozos de potencial de un electrón (izquierda) y de un protón (derecha) a partir de la expresión propuesta (4.5) y bajo las condiciones resumidas en la **Tabla 4-1**.

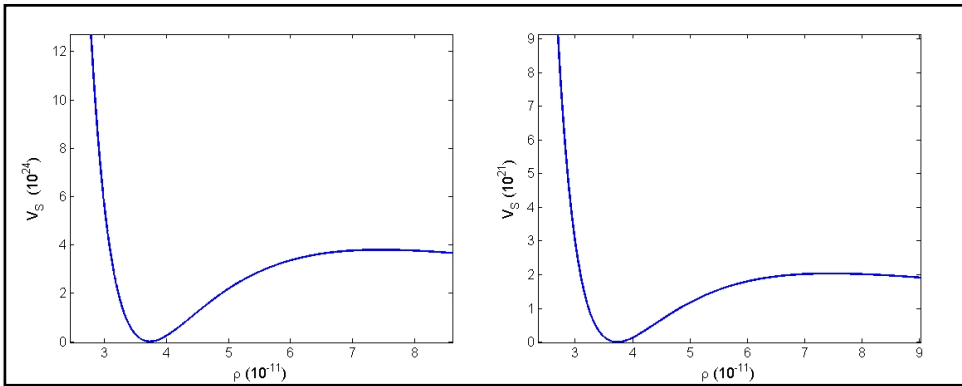


Figura 4-2. Pozos de potencial para un electrón (izquierda) y un protón (derecha) en unidades Gaussianas calculados a partir de la ecuación (4.5).

A raíz de los resultados de la **Figura 4-2**, en la **Tabla 4-2** se han resumido los valores característicos (ρ_{min}, ρ_{max}) y (V_{min}, V_{max}) de los pozos de potencial calculados a partir de la teoría de Störmer (4.4) y la ecuación propuesta (4. 5).

Tabla 4-2. Valores máximos y mínimos obtenidos en la Figura 4-1 y en la Figura 4-2 correspondientes a los potenciales calculados para un electrón y un protón a partir de la ecuación (4.4, 4.5). Todos los resultados se presentan en unidades Gaussianas.

Partícula	Störmer	Propuesto
Electrón ρ_{min}	1	$3.7270 \cdot 10^{-11}$
Electrón V_{min}	0	$1.388 \cdot 10^{19}$
Electrón ρ_{max}	2	$7.4547 \cdot 10^{-11}$
Electrón V_{max}	$3.125 \cdot 10^{-2}$	$3.7960 \cdot 10^{24}$
Protón ρ_{min}	1	$3.7270 \cdot 10^{-11}$
Protón V_{min}	0	$1.1330 \cdot 10^{14}$
Protón ρ_{max}	2	$7.4547 \cdot 10^{-11}$
Protón V_{max}	$1.702 \cdot 10^{-5}$	$2.0327 \cdot 10^{21}$

A la vista de los resultados de la **Tabla 4-2** los resultados obtenidos a partir del esquema propuesto (4. 5) y los obtenidos por la ecuación propuesta por Störmer (4.4) presentan el mismo comportamiento. En ambos casos la energía necesaria para escapar del pozo de potencial es menor para el protón. Además, en cada caso se cumple numéricamente que $\rho_{max} = 2\rho_{min}$.

4.2.1. Relación entre ambas aproximaciones

A partir de los resultados presentados en la Sección 2.2, a continuación se muestra la correlación existente entre la ecuación de Störmer (4.4) y la propuesta en esta tesis en coordenadas cilíndricas y unidades Gaussianas (4.5). Para ello se han evaluado ambas expresiones en $z = 0$ resultando cada una de estas expresiones de la forma siguiente:

$$V_s(\rho_s, z) = \frac{I}{2} \left(\frac{I}{\rho_s} - \frac{I}{\rho_s^2} \right)^2 \quad 4.10$$

$$V(\rho, z) = \frac{I}{2m} \left(\frac{p_\varphi}{\rho} - \frac{C_m m_z \rho}{\rho^3} \right)^2 \quad 4.11$$

Para buscar esta conexión entre ecuaciones, se propone una solución para ρ , $\rho = \alpha \cdot \rho_s$, y otra para los potenciales $V = A \cdot V_s$. Sustituyendo la expresión de ρ en la ecuación (4.11), operando y comparando el resultado obtenido con la ecuación (4.10) se llega a la conclusión de que la correlación entre las coordenadas adimensionales de Störmer y las coordenadas cilíndricas dependen del parámetro α de la forma

$$\alpha = \frac{eC m_z}{mp_\varphi c} \quad 4.12$$

Sin embargo, para pasar de un potencial (4.4) a otro (4.5) mediante una simple transformación el factor necesario, A , viene dado por

$$A = \frac{m \cdot \alpha^2}{p_\varphi^2} \quad 4.13$$

Gracias a estos dos parámetros α (4.12) y A (4.13) y mediante una simple transformación matemática se ha establecido una forma sencilla para cambiar un potencial adimensional (como el descrito por Störmer) a un potencial en unidades Gaussianas.

4.3. Esquemas Numéricos

4.3.1. Coordenadas Cilíndricas

Una parte importante de esta tesis se centra en el estudio previo publicado por Vázquez and Jiménez. (1988). Para ello se presenta un esquema numérico novedoso para integrar las ecuaciones de movimiento de una partícula cargada eléctricamente cuando se encuentra bajo la acción de un campo magnético dipolar.

El punto de partida como se ha mencionado anteriormente es una partícula no relativista cargada eléctricamente, un electrón, moviéndose en un campo magnético dipolar. Siguiendo la segunda ley de Newton, la ecuación de movimiento de ésta partícula viene dada por

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{e}{c} \vec{v} \times \vec{B} \quad 4.14$$

donde e y m corresponden a la carga y la masa del electrón respectivamente, y c es la velocidad de la luz. El estudio se centra en el movimiento de dicha partícula cuya posición viene dada por (x, y, z) y cuya velocidad viene dada por $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$. Se considera que el movimiento lo realiza en el entorno de un campo magnético dipolar similar al de la Tierra y que sigue la forma

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad 4.15$$

donde el potencial vector viene dado por $\vec{A} = A(-y, x, 0)$ y $A = \frac{-\mu}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$. Tal y

como se detalla en el artículo citado, en este caso hay dos cantidades conservadas: la energía y el momento angular azimutal, debido a la invariancia del Hamiltoniano bajo rotaciones en torno al eje z (Dragt, 1965).

Este problema en tres dimensiones se puede reducir a un problema de dos trabajando en el plano (ρ, z) donde se calcula la componente radial a partir de

$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$. A partir de dicho supuesto la ecuación de movimiento puede escribirse utilizando variables adimensionales como

$$\begin{aligned}\frac{d^2 z}{dt^2} &= -\frac{\partial U}{\partial z} \\ \frac{d^2 \rho}{dt^2} &= -\frac{\partial U}{\partial \rho}\end{aligned}\tag{4.16}$$

donde el potencial viene dado por la siguiente expresión

$$U(\rho, z) = \frac{I}{2} \left(\frac{I}{\rho} - \frac{\rho}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} \right)^2\tag{4.17}$$

Considerando la ecuación de movimiento (4.16) y con objeto de minimizar los errores acumulativos que se generan a lo largo de la integración del sistema se ha propuesto un esquema numérico nuevo. Este esquema conserva la energía cinética discreta y la simetría bajo inversiones de tiempo. Tal y como se detalla en el artículo de Vázquez and Jiménez. (1988) este esquema se puede resolver según z/ρ ó ρ/z . En este trabajo vamos a utilizar el esquema ρ/z , lo que implica la resolución de un sistema de ecuaciones no lineales acopladas.

$$\frac{\rho^{n+2} - 2\rho^{n+1} + \rho^n}{\Delta t^2} = -\frac{U(\rho^{n+2}, z^n) - U(\rho^n, z^n)}{\rho^{n+2} - \rho^n}\tag{4.18}$$

$$\frac{z^{n+2} - 2z^{n+1} + z^n}{\Delta t^2} = -\frac{U(\rho^{n+2}, z^{n+2}) - U(\rho^{n+2}, z^n)}{z^{n+2} - z^n}\tag{4.19}$$

Tal y como se ha comentado anteriormente la energía conservada asociada desde un punto de vista discreto para el esquema propuesto (4.19), viene dada por

$$E^n = \frac{1}{2} \left(\frac{z^{n+1} - z^n}{\Delta t} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\Delta t} \right)^2 + \frac{1}{2} [U(\rho^{n+1}, z^{n+1}) + U(\rho^n, z^n)] \quad 4.20$$

De acuerdo con el desarrollo numérico propuesto y de forma secuencial (primero se resolverá la ecuación (4.18) y a partir de dicho resultado se resolverá la ecuación (4.19)), se ha realizado una comparativa de las trayectorias descritas por diferentes partículas. A pesar de que para el estudio final se han seleccionado electrones, protones y partículas alfa (^4He), en esta primera verificación se ha trabajado exclusivamente con electrones y protones. El motivo de elegir estas partículas reside en el hecho de que éstas juegan un papel muy importante en las interacciones del viento solar con la atmósfera y el campo magnético del planeta.

A partir de estas consideraciones se han representado (Figura 4-3) las trayectorias atrapadas descritas por cada una de estas partículas.

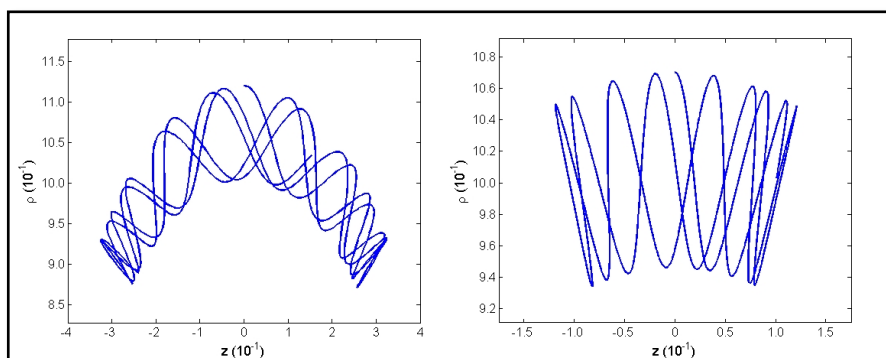


Figura 4-3. Trayectorias atrapadas descritas por un electrón (izquierda) y un protón (derecha) en el plano z-p a partir de las expresiones (4.5) y (4.6).

Para ello, se han seleccionado unas condiciones iniciales de posición y velocidad que aparecen descritas en la Tabla 4-3, teniendo en cuenta que los valores que se muestran son adimensionales, dada la naturaleza del esquema (4.18 y 4.19). Así mismo vienen descritos los valores de N , paso de iteración (número de puntos) y h , parámetro de discretización.

Tabla 4-3. Resumen de las condiciones iniciales adimensionales para el esquema numérico ρ/z (4.18 y 4.19) para un electrón y un protón.

Parámetro	Electrón	Protón
ρ_0	1.07	1.07
$v(\rho_0)$	0	0
z_0	0	1
$v(z_0)$	$3.55 \cdot 10^{-2}$	$2.55 \cdot 10^{-4}$
N	$1 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
h	$1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$

4.3.2. Coordenadas Cartesianas

En la Sección 2.3.1 se ha mostrado la trayectoria descrita por una partícula bajo la acción de un campo magnético dipolar pero con la restricción de eliminar un grado de libertad por motivos de simplificación de los cálculos. Sin embargo, el objetivo es eliminar esta limitación. Para ello se propone un nuevo esquema numérico que permita resolver sin limitaciones la ecuación de movimiento de una partícula bajo la acción de un campo magnético. Los resultados se han particularizado para las condiciones de Marte.

De forma habitual se suele trabajar con la segunda ley de Newton a partir de la posición de la partícula. Sin embargo, en este trabajo, en lugar de trabajar con las posiciones, nos hemos centrado en la velocidad de la misma. Por este motivo, para abordar el problema se ha discretizado la ecuación de movimiento (4.14) proponiendo un esquema numérico en coordenadas Cartesianas Ramírez-Nicolás et al. (2014), que viene descrito por la siguiente ecuación

$$\frac{\vec{v}^{n+1} - \vec{v}^n}{h} = \frac{e}{cm} \left(\frac{(\vec{v}^{n+1} + \vec{v}^n) \times \vec{B}^n}{2} \right) \quad 4.21$$

donde $h = \Delta t$.

Una de las principales características de dicho esquema es que al igual que en el esquema propuesto por Vázquez and Jiménez. (1988), la energía se conserva desde un punto de vista discreto. Con el objetivo de comprobar dicha

conservación, se ha multiplicado de forma escalar la ecuación (4.21) por $(\vec{v}^{n+1} - \vec{v}^n)$ resultando

$$\frac{I}{2}(\vec{v}^{n+1})^2 = \frac{I}{2}(\vec{v}^n)^2 \quad 4.22$$

Por otro lado el objetivo de este nuevo esquema es poder trabajar sin limitaciones ni restricciones respecto de las coordenadas utilizadas o las expresiones de campo magnético empleadas. Para solventar estos dos aspectos, en esta sección se ha trabajado con un campo magnético en coordenadas cartesianas de la forma $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$. Teniendo en cuenta este campo magnético, sustituyendo en la ecuación (4.21), operando y reagrupando términos se obtiene:

$$\begin{aligned} v_x^{n+1} - v_x^n &= \frac{eh}{2mc} \left[B_z (v_y^{n+1} + v_y^n) - B_y (v_z^{n+1} + v_z^n) \right] \\ v_y^{n+1} - v_y^n &= \frac{eh}{2mc} \left[B_x (v_z^{n+1} + v_z^n) - B_z (v_x^{n+1} + v_x^n) \right] \\ v_z^{n+1} - v_z^n &= \frac{eh}{2mc} \left[B_y (v_x^{n+1} + v_x^n) - B_x (v_y^{n+1} + v_y^n) \right] \end{aligned} \quad 4.23$$

Para reducir el tiempo de cálculo al procesar las ecuaciones, escribimos la ecuación (4.23) en forma matricial como

$$\begin{pmatrix} 1 & -\frac{eh}{2mc}B_z & \frac{eh}{2mc}B_y \\ \frac{eh}{2mc}B_z & 1 & -\frac{eh}{2mc}B_x \\ -\frac{eh}{2mc}B_y & \frac{eh}{2mc}B_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x^{n+1} \\ v_y^{n+1} \\ v_z^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{eh}{2mc}B_z & -\frac{eh}{2mc}B_y \\ -\frac{eh}{2mc}B_z & 1 & \frac{eh}{2mc}B_x \\ \frac{eh}{2mc}B_y & -\frac{eh}{2mc}B_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x^n \\ v_y^n \\ v_z^n \end{pmatrix} \quad 4.24$$

A partir de esta expresión (4.24) es posible obtener los valores de las velocidades en cada paso de la ejecución para la partícula. Utilizando estos valores se obtienen los valores de las posiciones de la misma empleando la ecuación (4.25).

$$\vec{r}^{n+1} = \vec{r}^n + \vec{v}^n \Delta t \quad 4.26$$

De esta forma quedan determinadas tanto la posición como la velocidad de cada partícula cargada eléctricamente para cualquier campo magnético.

Antes de entrar en detalle sobre los campos magnéticos empleados se estudió la validez del esquema. Para ello se ha comparado la solución del esquema (4.24) con la solución analítica de la ecuación de movimiento (4.14) asumiendo un campo magnético en la dirección del eje z de la forma $(0, 0, B_z)$ y asumiendo una solución del tipo ecuación de onda siguiendo:

$$\begin{aligned} v_x &= A \cdot \cos(wt + \varphi) \\ v_y &= -A \cdot \sin(wt + \varphi) \\ v_z &= B \end{aligned} \quad 4.27$$

donde A y B corresponden a las velocidades iniciales de la partícula según la dirección $A = v_x|_{t=0} = v_y|_{t=0} = v_0$ y $B = v_z|_{t=0}$. A partir de estas expresiones e integrando se obtiene la posición de la partícula en cada instante tal y como se describe en la ecuación (4.28).

$$\begin{aligned} x &= a + \frac{A}{w} \sin(wt + \varphi) \\ y &= b + \frac{A}{w} \cos(wt + \varphi) \\ z &= d + B \cdot t \end{aligned} \quad 4.28$$

donde $a = x_0$, $b = y_0$ y $d = z_0$ corresponden a las posiciones iniciales para $t = 0$. A continuación se han comparado ambas trayectorias para validar la solución del esquema numérico propuesto (Figura 4-4).

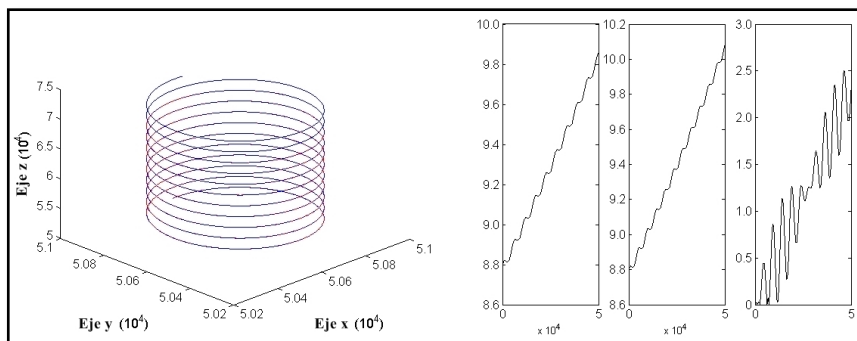


Figura 4-4. La figura de la izquierda corresponde con las trayectorias analítica (línea roja) y numérica (línea azul) de un electrón bajo las condiciones descritas. Los tres paneles de la figura de la derecha muestran los errores entre ambas soluciones, módulo de la solución real (MSR), módulo de la solución numérica (MSN) así como el porcentaje del error definido como $((MSN-MSR)/MSR)100$.

Fijándonos en la (Figura 4-4), en la que se han representado las trayectorias descritas por un electrón bajo la acción de un campo magnético constante en la dirección del eje z , queda demostrado como la solución analítica (línea roja) y la solución numérica (línea azul) describen exactamente la misma trayectoria. Este resultado resulta más evidente al analizar los resultados de la Figura 4-4 (derecha). En dicha figura se muestran las diferencias entre ambas trayectorias, viendo que las mayores diferencias representan tan sólo un 2.5 %, verificando de este modo la viabilidad del esquema propuesto.

Con la verificación de la viabilidad del esquema para la descripción de las trayectorias, pasamos a centrarnos en las expresiones de campo magnético que se han utilizado para el análisis. En el caso de estudio de esta Tesis, nos hemos centrado en las teorías que modelan los campos magnéticos a partir de fuentes magnetizadas, tal y como se describe en la Subsección 2.3.1. De esta forma se han planteado una serie de ecuaciones para describir las componentes de campo magnético. En este sentido se han utilizado dos fuentes elementales y la combinación lineal entre ambas. En los tres casos se tratan de volúmenes uniformemente magnetizados a una cierta distancia bajo la superficie marciana. A lo largo de esta sección se mostrará el trabajo desarrollado utilizando una esfera, un cilindro horizontal y la combinación lineal entre ambas. Para cada una de estas fuentes se han planteado las correspondientes ecuaciones del

campo magnético siguiendo lo planteado por Quesnel et al. (2008). En el caso de una esfera las componentes del campo magnético vienen descritas por:

$$\vec{B}_{Esfera} = \frac{C_{mE} \left(3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r} - r^2\vec{m} \right)}{r^5} \quad 4.29$$

donde C_{mE} es una valor constante, 10^{-7} , en unidades del Sistema Internacional y que dimensionalmente depende de $[C_m] = \frac{kg \cdot m}{A^2 \cdot s^2}$, \vec{m} es el momento dipolar y \vec{r} es el vector posición $\vec{r} = (x, y, z)$. En el caso del cilindro, la expresión para las componentes del campo eléctrico pasa a escribirse como

$$\vec{B}_{Cilindro} = \frac{2C_{mC} \left(2(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r} - r^2\vec{m} \right)}{r^4} \quad 4.30$$

donde C_{mC} en este caso tiene un valor de 10^{-5} en unidades del Sistema Internacional, \vec{r} es el vector posición descrito entre el centro de una sección transversal del cilindro y la medida directa sobre dicha sección. El momento dipolar, \vec{m} , depende directamente del radio del cilindro a , así como del vector magnetización \vec{M} según $\vec{m} = \pi a^2 \vec{M}$.

La principal diferencia entre el campo magnético generado por una esfera y por un cilindro, reside en que en el primer caso el campo decrece inversamente como el cubo de la distancia, mientras que en el segundo lo hace como el cuadrado de la misma. A partir de estas expresiones y asumiendo, por simplicidad, que el momento magnético está dirigido según la dirección del eje z , $(0, 0, m_z)$ las ecuaciones (4.29 y 4.30) en cada una de sus componentes pasan a escribirse para el caso de una esfera como (4.31):

$$\begin{aligned}
 B_{xE} &= \frac{3C_{mE} m_z x \cdot z}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{5/2}} \\
 B_{yE} &= \frac{3C_{mE} m_z y \cdot z}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{5/2}} \\
 B_{zE} &= \frac{C_{mE} m_z \left(2z^2 - x^2 - y^2\right)}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{5/2}}
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

mientras que para el caso de un cilindro pasan a escribirse como

$$\begin{aligned}
 B_{xC} &= \frac{4C_{mC} m_z z \cdot x}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^2} \\
 B_{yC} &= \frac{4C_{mC} m_z z \cdot y}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^2} \\
 B_{zC} &= \frac{2C_{mC} m_z \left(z^2 - x^2 - y^2\right)}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^2}
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

Sin embargo, los análisis no se han realizado únicamente sobre estas fuentes más simples sino sobre una combinación lineal entre ambas

$$\vec{B}_{EC} = \alpha \frac{C_{mE} \left(3 \left(\vec{m} \cdot \vec{r}\right) \vec{r} - r^2 \vec{m}\right)}{r^5} + \beta \frac{2C_{mC} \left(2 \left(\vec{m} \cdot \vec{r}\right) \vec{r} - r^2 \vec{m}\right)}{r^4} \tag{4.33}$$

donde α y β corresponden con dos factores constantes que indican la contribución de cada fuente más simple; esfera o cilindro respectivamente.

Teniendo en cuenta la expresión (4.33), las componentes correspondientes del campo magnético en coordenadas Cartesianas vienen descritas por la ecuación (4.34)

$$\begin{aligned}
 B_{xEC} &= \frac{m_z x \cdot z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \left(3C_{mE} \alpha + 4C_{mC} \beta \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \\
 B_{yEC} &= \frac{m_z y \cdot z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \left(3C_{mE} \alpha + 4C_{mC} \beta \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \\
 B_{zEC} &= \frac{m_z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \left(\alpha C_{mE} (2z^2 - x^2 - y^2) + 2\beta C_{mC} (z^2 - x^2 - y^2) \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

A partir de estas ecuaciones (4.29, 4.30 y 4.33) los campos magnéticos para cada una de las fuentes quedan perfectamente definidos. De este modo y utilizando la expresión (4.24), las velocidades de las partículas analizadas quedan determinadas de una forma inmediata.

4.4. Resultados Numéricos

En esta sección se pasa a describir los principales resultados obtenidos a partir de la teoría descrita en las secciones anteriores.

Como se ha descrito el objetivo principal es calcular las trayectorias descritas por partículas cargadas eléctricamente bajo la acción de un campo magnético en un entorno descrito por la principales características del planeta marciano, empleando para ello el esquema numérico propuesto (4.21).

4.4.1. Ajuste preliminar de parámetros

Además de la validación del esquema descrito en la Sección 4.3 es necesario realizar un ajuste inicial de los parámetros del esquema numérico. Con este propósito se ha considerado que las partículas cargadas eléctricamente se mueven en el vacío y sin ningún tipo de influencia de fuerzas externas tales como campos eléctricos, vientos atmosféricos o la interacción con el viento solar. Así mismo se han seleccionado los valores propuestos hasta la fecha para el momento dipolar característico de la superficie marciana. Por otra parte se han tenido en cuenta tanto los valores constantes utilizados en trabajos previos (Howard et al., 1999; Vázquez and Jiménez, 1988) que aparecen resumidos en la **Tabla 4-4**, como el hecho de trabajar en unidades Gaussianas.

Tabla 4-4. Resumen de los valores constantes utilizados para resolver el esquema numérico en unidades Gaussianas (NOTA: $1\text{esu}=1\text{statC}=1\text{g}^{1/2}\text{cm}^{3/2}\text{s}^{-1}$).

Parámetro	Valor
Carga del electrón (esu)	$4.8 \cdot 10^{-10}$
Carga del protón (esu)	$4.8 \cdot 10^{-10}$
Carga de la partícula alfa (esu)	$9.6 \cdot 10^{-10}$
Masa del electrón (g)	$9.1 \cdot 10^{-28}$
Masa del protón (g)	$1.7 \cdot 10^{-24}$
Masa de la partícula alfa (g)	$6.7 \cdot 10^{-24}$
Velocidad de la luz ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	$3.0 \cdot 10^{10}$
C_{mE} ($\text{g}\cdot\text{cm}/\text{esu}^2$)	$1.1 \cdot 10^{-19}$
C_{mC} ($\text{g}\cdot\text{cm}/\text{esu}^2$)	$1.1 \cdot 10^{-19}$
Momento dipolar (erg/G)	$2.6 \cdot 10^{19}$

Para poder realizar los cálculos se ha desarrollado un código en MATLAB (Matrix Laboratory) el cual permite resolver de una forma eficaz y rápida el esquema numérico propuesto para cada una de las configuraciones de campo magnético mencionadas anteriormente.

Con todo ello se han elegido dos casos de estudio iniciales:

- Comparación entre los resultados obtenidos por el esquema numérico en coordenadas Cilíndricas (4.18 y 4.19) y el propuesto en coordenadas Cartesianas (4.21) para un electrón bajo la acción de un campo magnético descrito por una esfera magnetizada (caso I).
- Trayectorias de un electrón, un protón y una partícula alfa bajo la acción de las diferentes configuraciones de campo magnético utilizando el esquema numérico propuesto en coordenadas Cartesianas (caso II).

En el caso I. Se han comparado las trayectorias obtenidas para un electrón en movimiento bajo la acción de un campo magnético que viene descrito por las ecuaciones (4.29) y (4.31), utilizando para ello el esquema numérico en coordenadas Cilíndricas descrito por Vázquez and Jiménez. (1988) y el esquema en coordenadas Cartesianas propuesto en esta tesis (Ramírez-Nicolás et al., 2014). Los resultados se muestran en la (Figura 4-5).

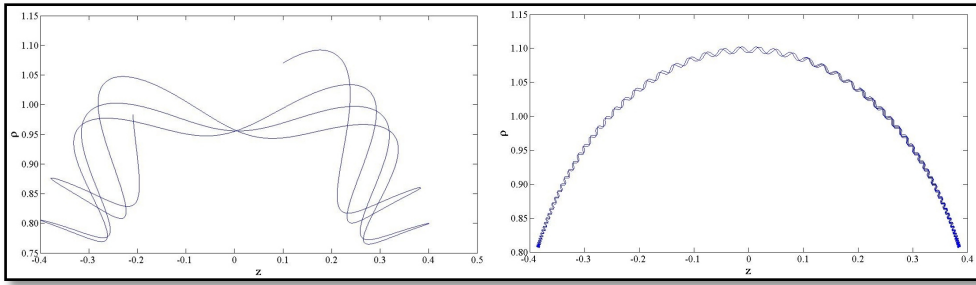


Figura 4-5. Trayectorias en el plano (ρ, z) descritas por un electrón en movimiento bajo la acción de un campo magnético generado por una esfera magnetizada. Izquierda, trayectoria a partir del esquema numérico descrito por las ecuaciones (4.18), (4.19). Derecha, trayectoria obtenida a partir del esquema numérico propuesto, ecuación (4.21).

En la Figura 4-5 se han representado ambas trayectorias. Mientras en la izquierda, se muestra la trayectoria del electrón a partir del esquema numérico descrito por (4.18), (4.19) y a partir de los valores de la Tabla 4-5, a la derecha se ha representado la trayectoria del electrón a partir de la expresión (4.21).

Tabla 4-5. Resumen de los valores correspondientes a los parámetros adimensionales que permiten resolver las ecuaciones (18) y (19) en coordenadas Cilíndricas.

Parámetro	Valor
(ρ, z)	(1.07, 0.10)
(v_ρ, v_z)	(0.05, 0.10)
N	5000
h	$1 \cdot 10^{-2}$

Sin embargo a la derecha la trayectoria representada corresponde a la solución proporcionada por la ecuación (4.21) y los parámetros recogidos en la Tabla 4-6. A la vista de los resultados, se observa como en ambos casos ha sido posible obtener una trayectoria atrapada para el electrón bajo las condiciones descritas. Ambos casos se han representado en coordenadas Cilíndricas por conveniencia, transformando los resultados obtenidos por el esquema numérico en coordenadas Cartesianas según $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$. En ambos casos se puede confirmar que la región de confinamiento es la misma a pesar de que la forma

sea diferente. Esto se debe a que es posible obtener el mismo valor de ρ , para múltiples configuraciones de los valores de x, y .

Tabla 4-6. Resumen de los parámetros principales iniciales para resolver la ecuación (21) en unidades Gaussianas.

Parámetro	Valor
(x, y, z)	(0.72, 0.81, 0.10)
(v_x, v_y, v_z)	(0.04, 0.03, 0.10)
N	5000
h	$1 \cdot 10^{-2}$

En el segundo caso (caso II.) una vez verificada la validez del esquema en coordenadas Cartesianas propuesto se han estudiado, comparado y analizado las trayectorias atrapadas y no atrapadas de tres tipos de partículas diferentes: electrón, protón y partícula alfa, en diferentes configuraciones de campo magnético (según lo descrito en la Subsección 4.3.2). Los resultados obtenidos se han representado en las Figura 4-6, Figura 4-7 y Figura 4-8.

Tal y como se muestra en estas figuras, cualquier partícula en movimiento bajo la influencia de un campo magnético describe trayectorias libres o confinadas (atrapadas) en función de la energía de las mismas. Siguiendo la teoría de Störmer, si una partícula alcanza la energía suficiente, perderá su estado de confinamiento y dispondrá de energía suficiente para describir una trayectoria libre. Sin embargo hay que tener en cuenta que en los estados de no confinamiento y en función del tiempo es posible encontrar para cualquier partícula, bajo estas condiciones, un periodo en el cual se encuentre confinada seguido de otro en el que no. Esto se traduce en que para tiempos pequeños en los que la partícula no ha alcanzado un nivel de energía elevado, las trayectorias que describen las mismas tienen un carácter confinado. Sin embargo, se alcanzan trayectorias de no confinamiento cuando para tiempos más largos estas partículas han alcanzado la energía suficiente para escapar del pozo de potencial y describen una trayectoria libre. Los resultados muestran que tanto la posición como la velocidad inicial de la partícula son fundamentales a la hora de alcanzar un estado u otro.

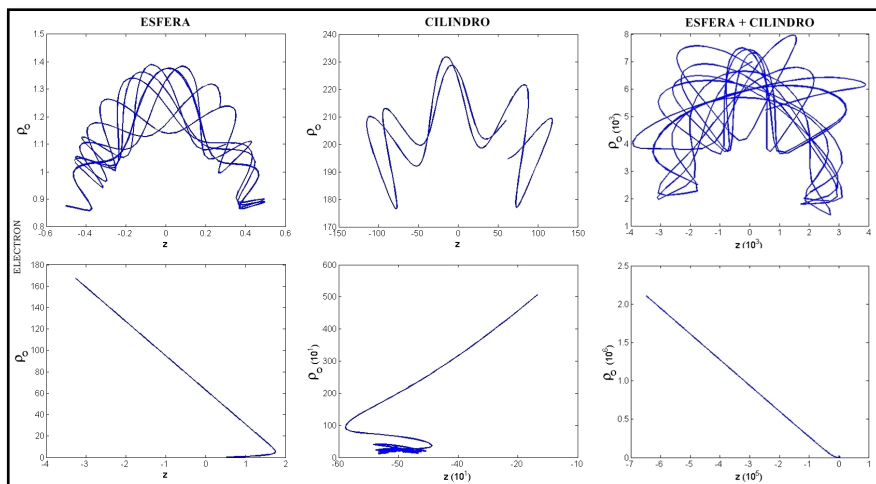


Figura 4-6. Trayectorias atrapadas (paneles superiores) y no atrapadas (paneles inferiores) descritas por un electrón bajo la acción de diferentes fuentes magnetizadas: esfera (izquierda), cilindro (centro) y la combinación lineal de ambas (derecha). De arriba abajo, y de izquierda a derecha cada fila de figuras corresponden con las trayectorias atrapadas y no atrapadas respectivamente: electrón-esfera (TES-UES), electrón-cilindro (TEC-UEC) y electrón-esfera+cilindro (TESC-UESC).

En los paneles superiores de la Figura 4-6 se han representado las trayectorias atrapadas (confinadas) correspondientes a un electrón, mientras que las no atrapadas se encuentran en los paneles inferiores. Para cada una de las simulaciones se ha partido de valores para las velocidades comprendidas entre los $(10^4\text{-}10^5)$ cm/s y un valor de N que varía entre los 200 y los 400. En los casos del protón y de la partícula alfa, los resultados se han representado en las Figura 4-7 y Figura 4-8. En ambos casos, los valores seleccionados para las velocidades iniciales de las partículas varían entre los $(10^4\text{-}10^6)$ cm/s, mientras que el número de pasos lo hace entre 300 y 1000. Por conveniencia, todos los resultados de las figuras Figura 4-6, Figura 4-7 y Figura 4-8 se han representado en coordenadas Cilíndricas, a pesar de que los cálculos se han realizado en coordenadas Cartesianas.

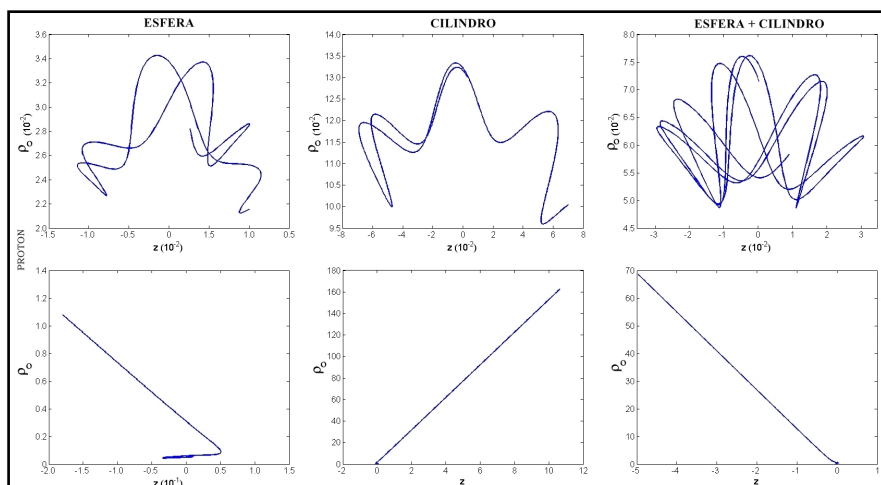


Figura 4-7. Igual que en la Figura 4-6 considerando el movimiento de un protón. De arriba abajo, y de izquierda a derecha cada fila de figuras corresponden con las trayectorias atrapadas y no atrapadas respectivamente: protón-esfera (TPS-UPS), protón-cilindro (TPC-UPC) y protón-esfera+cilindro (TPSC-UPSC).

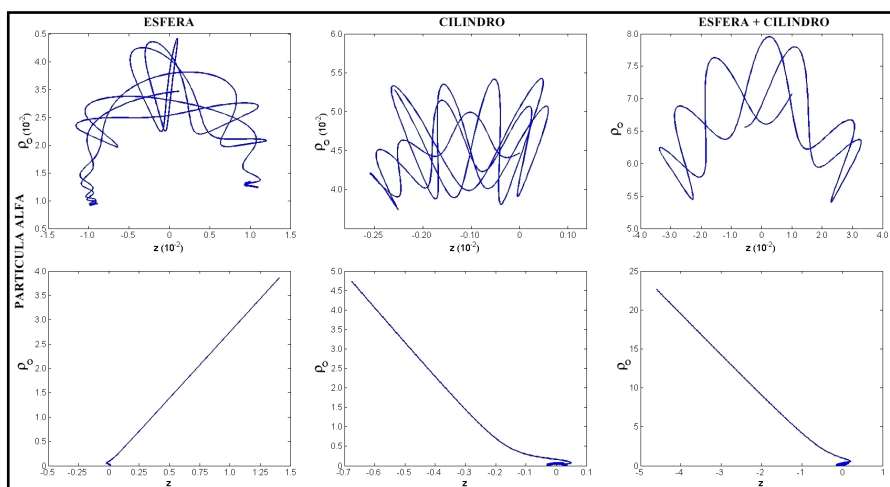


Figura 4-8. Igual que en la Figura 4-6 considerando el movimiento de una partícula alfa. De arriba abajo, y de izquierda a derecha cada fila de figuras corresponden con las trayectorias atrapadas y no atrapadas respectivamente: protón-esfera (TAS-UAS), protón-cilindro (TAC-UAC) y protón-esfera+cilindro (TASC-UASC).

En Tabla 4-7, Tabla 4-8 y Tabla 4-9 se resumen los valores y parámetros iniciales empleados para resolver el esquema numérico en cada uno de los casos.

Tabla 4-7. Valores de las condiciones iniciales para la posición, r_0 , (en coordenadas Cartesianas) y el parámetro de discretización, h , para un electrón. Los valores se han descrito en unidades Gaussianas.

Parámetro	TES	TPS	TAS
h	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
r_0	(0.02, 1.10, 0.30)	(0.02, 0.008, 0.001)	(0.01, 0.009, 0.01)
Parámetro	UES	UPS	UAS
h	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
r_0	(0.30, 0.40, 0.80)	(0.01, 0.05, 0.01)	(0.01, 0.009, 0.01)

Tabla 4-8. Valores de las condiciones iniciales para la posición, r_0 , (en coordenadas Cartesianas) y el parámetro de discretización, h , para un protón. Los valores se han descrito en unidades Gaussianas.

Parámetro	TEC	TPC	TAC
h	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
r_0	(60, 200, 60)	(0.01, 0.10, 0.07)	(0.04, 0.02, 0.01)
Parámetro	UEC	UPC	UAC
h	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
r_0	(60, 200, 60)	(0.01, 0.10, 0.07)	(0.04, 0.02, 0.01)

Tabla 4-9. Valores de las condiciones iniciales para la posición, r_0 , (en coordenadas Cartesianas) y el parámetro de discretización, h , para una partícula alfa. Los valores se han descrito en unidades Gaussianas.

Parámetro	TESC	TPSC	TASC
h	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$
r_0	(70, 7000, 70)	(0.03, 0.05, 0.009)	(0.01, 0.07, 0.01)
Parámetro	UESC	UPESC	UASC
h	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
r_0	(70, 7000, 70)	(0.03, 0.05, 0.009)	(0.01, 0.07, 0.01)

A la vista de los resultados anteriores y a partir de esquema numérico propuesto para cada una de las partículas analizadas se ha obtenido una familia de soluciones atrapadas para cada una de éstas. Tal y como se espera a partir de los análisis teóricos, los valores correspondientes al parámetro de discretización son menores en el caso de las partículas no atrapadas.

Por otra parte, la estabilidad del esquema empleado se ha podido confirmar a partir de la conservación de la energía cinética ya que para simulaciones a tiempos largos y para cualquier valor de velocidad empleado este valor permanece inalterable. En la **Tabla 4-10** se muestra un ejemplo del orden de magnitud de dichos valores, para los casos de las tres partículas estudiadas y una esfera uniformemente magnetizada. Dichos valores permanecen constantes bajo cambios en las condiciones iniciales del esquema.

Tabla 4-10. Valores de energía cinética para una partícula cargada eléctricamente (electrón, protón y partícula alfa) bajo la acción de un campo magnético generado por una esfera uniformemente magnetizada.

Partícula	Electrón	Protón	Partícula Alfa
Energía cinética (erg)	$2.0475 \cdot 10^{-21}$	$5.1000 \cdot 10^{-18}$	$6.5325 \cdot 10^{-18}$

4.4.2. Condiciones iniciales realistas

Hasta este punto además de confirmar la validez del esquema propuesto se han obtenido trayectorias confinadas para diferentes tipos de partículas bajo diferentes condiciones. En esta Sección se ha trabajado con el mismo esquema numérico pero con valores realistas para las condiciones iniciales. Por este motivo se han seleccionado valores para las velocidades iniciales del orden 10^2 km/s, es decir 10^7 cm/s en unidades Gaussianas. Dichos valores se aproximan a los valores característicos del viento solar. Aunque el estudio se ha realizado para todas las fuentes propuestas, se muestran los relacionados con una esfera magnetizada por su similitud al campo magnético dipolar terrestre. En coordenadas Cartesianas y unidades Gaussianas, los valores configurados para la ejecución del esquema son: $(-9 \cdot 10^7, -5 \cdot 10^7, -2 \cdot 10^7)$ para la velocidad inicial, y $(0.02, 0.009, 0.03)$ para la posición inicial de la partícula. $N=200$ y $h=1 \cdot 10^{-11}$. En la **Figura 4-9** se muestran las trayectorias confinadas del electrón bajo las condiciones enumeradas anteriormente.

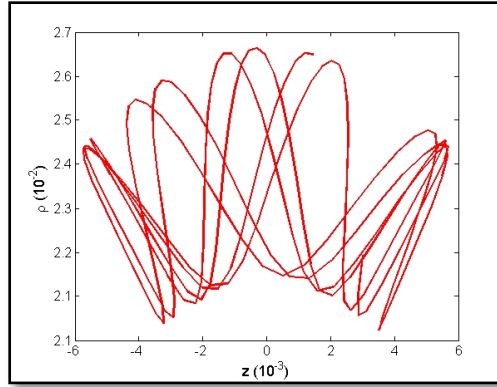


Figura 4-9. Trayectoria confinada descrita por un electrón en movimiento con velocidades del orden de km/s, obtenida a partir del esquema numérico propuesto en coordenadas Cartesianas.

Al igual que los resultados mostrados en la Sección anterior y a la vista de la Figura 4-9, se han podido obtener las trayectorias confinadas para un electrón bajo las condiciones mencionadas. Del mismo modo se han obtenido la conservación de la energía cinética alcanzando un valor de $4.67 \cdot 10^{-11}$ erg. Por otra parte, los valores estimados para las tres componentes del campo magnético generado por una esfera magnetizada se encuentran comprendidos entre los 10^2 nT y los 10^3 nT. Estos valores coinciden perfectamente con los calculados a partir tanto del modelo teórico propuesto por Cain et al. (2003) como de los datos registrados por la MGS.

Para dar un paso más en el análisis que nos ocupa, se ha estudiado el efecto de la gravedad para cada uno de los escenarios propuestos. Con este propósito se ha asumido que las partículas se están moviendo a una altura próxima a la superficie. Es esta fuerza una de las principales a tener en cuenta en la trayectoria de una partícula. Al introducir la fuerza de la gravedad, la ecuación de movimiento (4.14) pasa a escribirse como

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{e}{c} (\vec{v} \times \vec{B}) + m \vec{g} \quad 4.35$$

donde el vector gravedad viene dado por $\vec{g} = \left(0, 0, -\frac{GM}{r^2}\right)$ a lo largo del eje z dirigida al centro del planeta, G es la constante de gravitación universal, M es la masa de Marte $M = 6.418 \cdot 10^{23}$ kg y $r = R + h_p$ es la altura a la que se encuentra la partícula, siendo $R = 3397.2$ km el radio del planeta y h_p la altura respecto de la superficie del planeta a la que se encuentra la misma. Para este caso, al igual que en el anterior, se muestran los resultados de un electrón interaccionando con el campo magnético generado por una esfera uniformemente imanada. La **Tabla 4-11** recoge los valores iniciales empleados en esta ocasión, mientras que la **Figura 4-10** muestra las trayectorias descritas bajo diferentes configuraciones.

Tabla 4-11. Resumen de las condiciones iniciales utilizadas para analizar el efecto de la gravedad en la trayectoria de un electrón bajo el campo generado por una esfera uniformemente imanada.

Parámetro	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3
h	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-11}$
N	200	500	300
r_0	$(2 \cdot 10^{-2}, 1 \cdot 10^{-3}, 4 \cdot 10^{-3})$	$(1 \cdot 10^{-2}, 7 \cdot 10^{-3}, 1 \cdot 10^{-3})$	$(2 \cdot 10^{-2}, 1 \cdot 10^{-2}, 5 \cdot 10^{-3})$
v_0	$(-2 \cdot 10^6, -7 \cdot 10^6, -2 \cdot 10^6)$	$(-2 \cdot 10^7, -5 \cdot 10^7, -2 \cdot 10^7)$	$(-6 \cdot 10^7, -7 \cdot 10^7, -2 \cdot 10^7)$

La **Figura 4-10** representa las trayectorias del electrón bajo las condiciones descritas anteriormente y teniendo en cuenta la ecuación de movimiento descrita por (4.35). La línea azul corresponde con la trayectoria descrita sin tener en cuenta la acción de la fuerza gravitacional, mientras que en rojo se describe la trayectoria teniendo en cuenta la misma.

Se han representado para dicho análisis tres configuraciones (**Tabla 4-11**) diferentes en función de los valores iniciales de posición y velocidad para el electrón. Para este caso de análisis hay que destacar que se han tomado valores para la velocidad del electrón semejantes a los que se describen típicamente para las partículas transportadas en el viento solar.

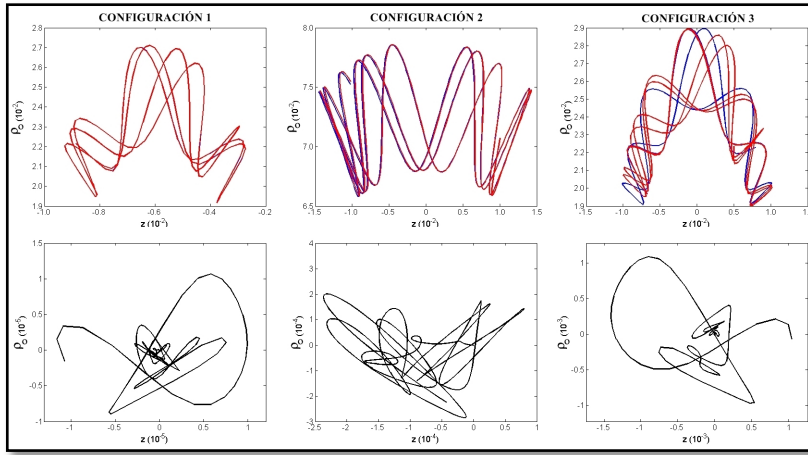


Figura 4-10. Trayectorias confinadas de un electrón para diferentes configuraciones (paneles superiores). En azul, aparecen las trayectorias sin considerar el efecto de la gravedad, mientras que las descritas en rojo sí lo hacen. Los paneles inferiores corresponden a las diferencias que existen entre ambas trayectorias, $\Delta Error$.

Los resultados aparecen en los paneles superiores. Con el objetivo de poder cuantificar las diferencias entre ambas trayectorias, en los paneles inferiores y en color negro aparecen representadas las diferencias entre ambas, $\Delta Error$. A la vista de los resultados, queda de manifiesto cómo la diferencia entre ambas trayectorias aumenta según aumentan los valores de las velocidades de las partículas. Hay que resaltar que las configuraciones de N y h no tienen ningún impacto para las diferencias entre las trayectorias. A mayor velocidad del electrón, mayores diferencias entre las trayectorias descritas.

4.5. Momento Angular

Por último en esta Sección se va a tratar otro aspecto fundamental en el movimiento de las partículas cargadas eléctricamente, como lo es el momento angular de las mismas.

En un sistema continuo, la ecuación de movimiento de una partícula no relativista viene descrita por la ecuación (4.14), teniendo en cuenta que $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$.

Por otra parte, y desde un punto de vista general la ecuación del momento angular se escribe como:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m \cdot \vec{v} \quad 4.36$$

cuya ley de variación temporal queda descrita en la ecuación (4.37)

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{r} \times \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{r} \times \frac{e}{c} (\vec{v} \times \vec{B}) \quad 4.37$$

Trabajando sobre dicha ecuación (4.37), operando el triple producto vectorial resulta:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{e}{c} [\vec{v}(\vec{r} \cdot \vec{B}) - \vec{B}(\vec{r} \cdot \vec{v})] = \frac{e}{c} \left[\vec{v}(\vec{r} \cdot \vec{B}) - \frac{d\vec{r}^2}{dt} \right] \quad 4.38$$

Con el propósito de poder comparar el momento angular de la partícula desde un punto de vista discreto y continuo, se ha discretizado tanto la ecuación de movimiento (4.14) como la relación entre la posición y la velocidad de la misma:

$$\frac{\vec{v}^{n+1} - \vec{v}^n}{\Delta t} = \frac{e}{c} \cdot \frac{\vec{v}^{n+1} + \vec{v}^n}{2} \times \vec{B} \quad 4.39$$

$$\frac{\vec{r}^{n+1} - \vec{r}^n}{\Delta t} = \frac{\vec{v}^{n+1} + \vec{v}^n}{2} \quad 4.40$$

Para alcanzar el objetivo fijado se ha trabajado sobre estas expresiones. En un primer paso se expresó la ley de conservación de la energía cinética desde un punto de vista discreto. Para lo cual se multiplicó escalarmente la ecuación

(4.39) por $\frac{\vec{v}^{n+1} + \vec{v}^n}{2}$, según

$$\frac{\vec{v}^{n+1} + \vec{v}^n}{2} \cdot \frac{\vec{v}^{n+1} - \vec{v}^n}{\Delta t} = 0 \quad 4.41$$

expresión que nos conduce a

$$\frac{1}{2}m\left(\vec{v}^{n+1}\right)^2 = \frac{1}{2}m\left(\vec{v}^n\right)^2 \quad 4.42$$

Por otra parte, para llegar a la expresión del momento angular se ha multiplicado vectorialmente a ambos lados de la ecuación (4.39) por $\frac{\vec{r}^{n+1} + \vec{r}^n}{2}$, reescribiéndose como

$$\frac{\vec{r}^{n+1} + \vec{r}^n}{2} \times m \cdot \frac{\vec{v}^{n+1} - \vec{v}^n}{\Delta t} = \frac{e}{c} \cdot \left(\frac{\vec{r}^{n+1} + \vec{r}^n}{2} \times \frac{\vec{v}^{n+1} + \vec{v}^n}{\Delta t} \times \vec{B} \right) \quad 4.43$$

A partir de este punto, se ha analizado cada término de la ecuación (4.43) por separado. Centrándonos en el término de la izquierda de la ecuación (4.43) y operando el mismo, se puede escribir como

$$m \cdot \frac{\vec{r}^{n+1} + \vec{r}^n}{2} \times \frac{\vec{v}^{n+1} - \vec{v}^n}{\Delta t} = m \cdot \frac{\vec{r}^{n+1} \times \vec{v}^{n+1} - \vec{r}^n \times \vec{v}^n}{2\Delta t} + m \cdot \frac{-\vec{r}^{n+1} \times \vec{v}^n + \vec{r}^n \times \vec{v}^{n+1}}{2\Delta t} \quad 4.44$$

Sumando y restando al término de la derecha de la ecuación (4.44) $m \cdot \frac{\vec{r}^{n+1} + \vec{v}^{n+1}}{2\Delta t}$,

$m \cdot \frac{\vec{r}^n \times \vec{v}^n}{2\Delta t}$ y reagrupando términos, la expresión se convierte en

$$\frac{\vec{r}^{n+1} + \vec{r}^n}{2} \times m \cdot \frac{\vec{v}^{n+1} - \vec{v}^n}{\Delta t} = m \cdot \frac{\vec{r}^{n+1} \times \vec{v}^{n+1} - \vec{r}^n \times \vec{v}^n}{\Delta t} \quad 4.45$$

que en términos de momento angular puede escribirse como:

$$\frac{\vec{r}^{n+1} + \vec{r}^n}{2} \times m \cdot \frac{\vec{v}^{n+1} - \vec{v}^n}{\Delta t} = m \cdot \frac{\vec{L}^{n+1} - \vec{L}^n}{\Delta t} \quad 4.46$$

Si nos centramos ahora en el término de la derecha de la ecuación (4.43), operando el triple producto vectorial se obtiene que

$$\frac{e}{c} \left(\frac{\vec{r}^{n+l} + \vec{r}^n}{2} \times \frac{\vec{v}^{n+l} + \vec{v}^n}{2} \times \vec{B} \right) = \frac{e}{c} \left[\frac{\vec{v}^{n+l} + \vec{v}^n}{2} \left(\frac{\vec{r}^{n+l} + \vec{r}^n}{2} \cdot \vec{B} \right) - \vec{B} \left(\frac{\vec{r}^{n+l} + \vec{r}^n}{2} \cdot \frac{\vec{v}^{n+l} + \vec{v}^n}{2} \right) \right] \quad 4.47$$

En este punto, y teniendo en cuenta la discretización del vector posición de la partícula propuesta (4.40), la ecuación (4.47) puede escribirse como

$$\frac{e}{c} \left(\frac{\vec{r}^{n+l} + \vec{r}^n}{2} \times \frac{\vec{v}^{n+l} + \vec{v}^n}{2} \times \vec{B} \right) = \frac{e}{c} \left[\frac{\vec{v}^{n+l} + \vec{v}^n}{2} \left(\frac{\vec{r}^{n+l} + \vec{r}^n}{2} \cdot \vec{B} \right) - \vec{B} \left(\frac{\left(\frac{\vec{r}^{n+l}}{2} \right)^2 - \left(\frac{\vec{r}^n}{2} \right)^2}{\Delta t} \right) \right] \quad 4.48$$

A partir de esta breve descripción matemática (Ramírez-Nicolás et al., 2015a), se ha podido comprobar cómo el esquema propuesto (4.39) satisface el análogo discreto de la ley de variación del momento angular desde un punto de vista continuo. Uniendo todos los resultados descritos se concluye que

$$\frac{\vec{L}^{n+l} - \vec{L}^n}{\Delta t} = \frac{e}{c} \cdot \left[\frac{\vec{v}^{n+l} + \vec{v}^n}{2} \left(\frac{\vec{r}^{n+l} + \vec{r}^n}{2} \right) \vec{B} - \vec{B} \left(\frac{\left(\frac{\vec{r}^{n+l}}{2} \right)^2 - \left(\frac{\vec{r}^n}{2} \right)^2}{\Delta t} \right) \right] \quad 4.49$$

De este modo queda de manifiesto cómo la conservación del momento angular se mantiene tanto para un sistema continuo como para uno discreto.

Para ver los resultados de una forma gráfica se han analizado dos casos particulares en los que la partícula se mueve en diferentes campos magnéticos:

- ∞ Campo magnético constante en la dirección del eje z (caso III)
- ∞ Campo magnético generado por una esfera uniformemente imanada (caso IV)

Para el estudio de ambos casos se ha utilizado, al igual que en la sección anterior, una partícula cargada eléctricamente con carga e y masa m . En el caso

III. la partícula se encuentra bajo la acción de un campo magnético según la dirección del eje z , según $\vec{B} = (0, 0, B_z)$ y en movimiento en el plano perpendicular a dicho campo magnético, con una velocidad $\vec{v} = (v_x, v_y, 0)$. Con estas premisas, el caso particular de estudio viene descrito por las componentes para la velocidad (4.50) y para la posición (4.51) del siguiente modo

$$\begin{aligned} v_x &= a \cdot \text{sen}(wt + \varphi) \\ v_y &= a \cdot \cos(wt + \varphi) \end{aligned} \quad 4.50$$

$$\begin{aligned} x &= -\frac{a}{w} \cos(wt + \varphi) \\ y &= -\frac{a}{w} \text{sen}(wt + \varphi) \end{aligned} \quad 4.51$$

donde a y φ son dos constantes que dependen de las velocidades iniciales y w corresponde con la frecuencia ciclotrónica de la carga, que viene descrita por

$$w = \frac{eB}{mc} \quad 4.52$$

Bajo estas de consideraciones y teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores, se han representado tanto la solución analítica (4.50 y 4.51) como la numérica (4.21 y 4.26) para un electrón en movimiento en el entorno de un campo magnético constante (Figura 4-11).

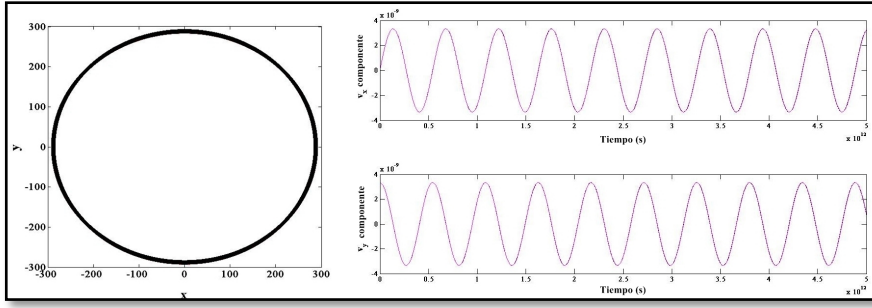


Figura 4-11. El panel de la izquierda, corresponde a la trayectoria descrita por un electrón en coordenadas Cartesianas obtenidas a partir de la solución numérica (4.21, 4.26) en negro, mientras que en rojo se representa la solución analítica (4.51). Los dos paneles de la derecha comparan las soluciones numéricas (negro) y analíticas (rojo) de las componentes x (arriba) e y (abajo) de la velocidad de la partícula.

A la vista de los resultados obtenidos (Figura 4-11), se comprueba cómo el esquema numérico propuesto reproduce la solución real del sistema propuesto para tiempos muy largos. Por este motivo, este esquema se puede emplear con gran precisión para aquellos sistemas en los que se desconoce la solución analítica. Después de certificar la validez del esquema, se ha trabajado con el caso IV. En este caso se ha utilizado un campo magnético dipolar general en coordenadas Cartesianas.

$$B_x = \frac{\mu}{4\pi} \frac{3m_z xz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad 4.53$$

$$B_y = \frac{\mu}{4\pi} \frac{3m_z yz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad 4.54$$

$$B_z = \frac{\mu}{4\pi} \frac{2m_z z^2 - m_z x^2 - m_z y^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad 4.55$$

donde μ es la permeabilidad en el vacío. En esta ocasión no se ha establecido ningún tipo de restricción para las posiciones o velocidades, ya que el objetivo es

analizar el caso más general. Con todo ello se han representado los momentos angulares correspondientes desde un punto de vista tanto discreto como continuo. En la **Figura 4-12** se han representado las trayectorias del electrón en coordenadas Cartesianas (izquierda) así como la correspondiente en el plano (ρ, z) (derecha).

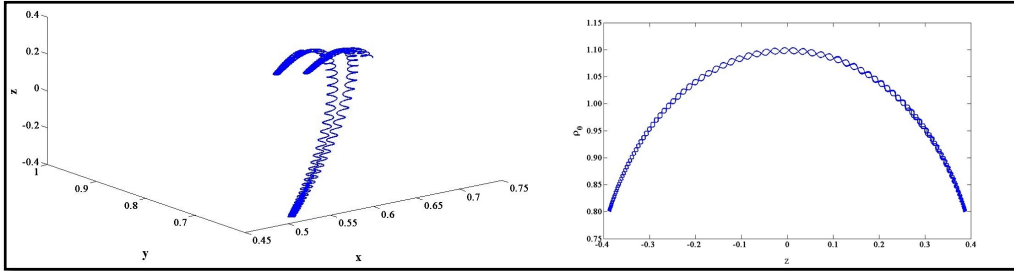


Figura 4-12. La figura de la izquierda representa la trayectoria del electrón en coordenadas Cartesianas en unidades Gaussianas. A la derecha, la trayectoria correspondiente representada en el plano (ρ, z) .

A partir de estos resultados, a continuación se han representado las tres componentes del momento angular L_x , L_y y L_z (**Figura 4-13**).

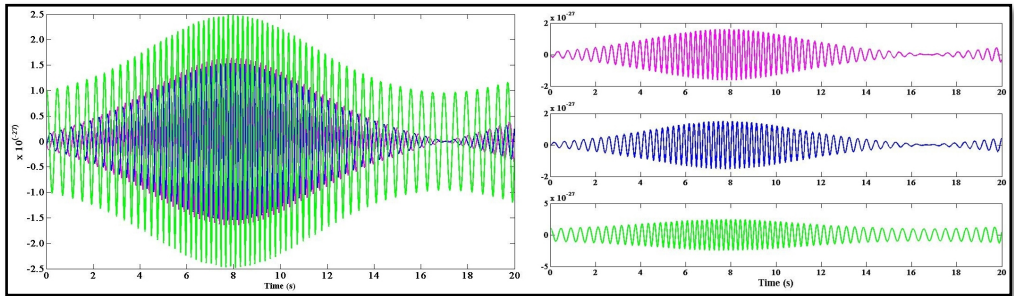


Figura 4-13. Comparación del momento angular en unidades del SI. A la izquierda, las tres componentes del momento angular obtenidas a partir de los términos de la derecha de las ecuaciones (4.45), (4.46) y (4.48). A la derecha se muestran las tres componentes del momento angular, L_x (rosa), L_y (azul) y L_z (verde), de un electrón en movimiento bajo la acción de un campo magnético dipolar.

A la vista de los resultados mostrados en la **Figura 4-13**, se puede concluir que la evolución temporal de cada una de las componentes del momento angular es equivalente desde los puntos de vista continuo y discreto. Dicha figura se ha reproducido de forma exacta para cada uno de los términos (de la derecha) de las ecuaciones (4.45), (4.46) y (4.48), tanto en los valores como en la evolución del mismo (Ramírez-Nicolás et al., 2015a).

4.6. Discusión I

A lo largo de esta Sección se ha realizado un análisis detallado del comportamiento de diferentes partículas cargadas eléctricamente bajo diferentes condiciones, fundamentalmente campos magnéticos. Con este propósito se ha desarrollado un esquema numérico en coordenadas Cartesianas capaz de describir las trayectorias de cualquier partículas bajo la acción de cualquier campo magnético de una forma sencilla, rápida y directa. Uno de los primeros resultados alcanzados, consistió en reproducir los resultados descritos por la teoría de Störmer a partir del esquema propuesto en esta Tesis. Una de las principales ventajas de dicho esquema reside en resolver la ecuación de movimiento de una partícula a partir de ecuaciones en derivadas parciales en primer orden (4.21 y 4.26) en lugar de segundo orden (4.18 y 4.19). Por otra parte, el esquema plantea la posibilidad de utilizar cualquier expresión de campo magnético sin ninguna restricción, permitiendo realizar un mayor número de estudios. A partir de dicho esquema, en primer lugar, se ha comprobado la validez del mismo, comparando las trayectorias descritas por el esquema numérico en coordenadas Cilíndricas (4.18 y 4.19) con las obtenidas en coordenadas Cartesianas (4.21 y 4.26). A la vista de los resultados (**Figura 4-5**) se ha confirmado la validez el esquema propuesto, ya que se reproducen exactamente los resultados descritos por otros autores (Vázquez and Jiménez, 1988) es estudios previos.

De los resultados directos mostrados en esta sección, se ha comparado la aproximación Cartesiana sugerida (4.11), con la teoría de Störmer (Störmer, 1907). De este modo se han reproducido los pozos de potencial tanto para un electrón como para un protón en un campo dipolar, proporcionando los valores correspondientes al atrapamiento de dichas partículas en los respectivos pozos. Trabajando en unidades Gaussianas, se ha obtenido que para que un electrón

pueda escapar del pozo de potencial necesita un valor de V mayor de $3.796 \cdot 10^{24}$. Sin embargo para un protón y una partícula alfa este umbral se sitúa en torno a $\sim 10^{24}$.

Por otra parte, a partir de los cálculos descritos ha sido posible reproducir las trayectorias confinadas para cada una de las partículas analizadas bajo la acción de diferentes fuentes magnéticas. Todos los cálculos (de esta primera parte de la sección) se han desarrollado para condiciones características de Marte, en cuanto a masa, gravedad... En primer lugar, se ha comprobado cómo la energía cinética de cada una de las partículas permanece constante para cualquier intervalo computado, lo cual proporciona una gran estabilidad el esquema propuesto. Ya que la energía cinética depende directamente de la masa de la partícula, se han obtenido valores tres órdenes de magnitud mayores en el caso de la partícula alfa y del protón que para el caso del electrón. Estos valores se han obtenido para casos en los que las partículas describían trayectorias confinadas.

A pesar de que el esquema propuesto no incluye todas las fuerzas que pueden influir en las trayectorias descritas por las partículas, en primera aproximación se ha completado el mismo añadiendo la fuerza gravitacional. Para este cálculo se ha considerado que el valor de la gravedad en Marte se corresponde con aproximadamente 1/3 del valor de la gravedad en la Tierra. A la vista de los resultados obtenidos (**Figura 4-10**), vemos que si bien la acción de la gravedad influye en los valores de las trayectorias, no modifica sustancialmente la forma descrita de cada una de ellas. Comparando los resultados obtenidos para un electrón y para una partícula alfa, se ha podido constatar cómo estas desviaciones son aún menores, para el primer caso que para el segundo.

Respecto al segundo aspecto analizado en esta sección, el momento angular de una partícula, se ha estudiado si los resultados son equivalentes desde un punto de vista continuo y discreto. Persiguiendo dicho objetivo, se ha descrito un completo análisis matemático analizando la obtención del momento angular de una partícula desde el punto de vista continuo (4.21 y 4.26) y discreto (4.39 y 4.40). A partir de los resultados obtenidos se realizó un estudio preliminar. En este estudio se ha trabajado con el movimiento de una partícula cargada eléctricamente (un electrón) en un campo magnético constante. Los

resultados han permitido concluir que las ecuaciones numéricas propuestas reproducen la solución analítica del sistema, permitiendo analizar con total confianza sistemas en los que la solución analítica sea completamente desconocida. En este sentido se trabajó con el movimiento de un electrón en un campo magnético dipolar general para obtener los valores del momento angular desde un punto de vista continuo y discreto. A la vista de las gráficas obtenidas (**Figura 4-13**), se puede concluir que los resultados son perfectamente equivalentes ya que para los tres términos de la derecha planteados en las ecuaciones (4.45, 4.46 y 4.48) se obtienen exactamente el mismo resultado, tanto para las componentes como para el módulo.

CAPÍTULO

5

RESULTADOS II. ANÁLISIS DEL CAMPO MAGNÉTICO

En este capítulo se describe otro aspecto importante de las partículas cargadas eléctricamente, la interacción de dichas partículas con la ionosfera marciana. En este Capítulo nos hemos centrado en analizar y estudiar los efectos directos de dicha interacción. Para ello se han empleado los datos obtenidos por el radar MARSIS a bordo de la Mars Express.

5.1. Descripción general, estudios previos

Tal y como se describió en el Capítulo 2 Marte carece de un campo magnético global que sirva como escudo protector al planeta. Por este motivo la interacción entre el viento solar y las capas más altas de la atmósfera parece ser la clave en los procesos de pérdida atmosféricos. La interacción directa entre el viento solar y la atmósfera genera lo que se conoce como onda de choque, siendo la región más externa del plasma en Marte (Edberg et al., 2008). A continuación se define la “*magnetic pileup boundary*” (MPB), un límite delgado y bien definido de plasma entre la onda de choque y el límite ionosférico interior (Bertucci et al., 2005). Dicho límite se genera debido al balance entre la presión térmica del viento solar en la magnetosfera y la presión del campo magnético inducido (Dubinin et al., 2008; Edberg et al., 2009). La última región resultante de dicha interacción es el límite foto-electrónico (*photo-electron boundary*, PEB), tal y como se describe en el artículo de Frahm et al. (2006). Este límite marca la región a partir de la cual el campo magnético interplanetario no se adentra en mayor profundidad en la ionosfera, recibiendo el nombre de ionopausa (Cravens, 1997). La ionopausa se entiende como la interfaz que existe entre el viento solar y el plasma ionosférico (Belehaki et al., 2006).

En este contexto, en ocasiones la presión térmica ionosférica no es lo suficientemente grande como para contrarrestar la presión dinámica del viento solar, provocando que la propia magnetosfera quede magnetizada. Este proceso ha podido verificarse en otros planetas como en Venus (Shinagawa and Cravens, 1989; Shinagawa, 1992; Zhang and Luhmann, 1992; Russell and Zhang, 1992; Krymskii, 1992; Krymskii et al., 1995, Shinagawa, 1996; Shinagawa, 2004), donde se ha podido visualizar este efecto a partir de los perfiles verticales de densidad electrónica, tal y como aparece en la **Figura 5-1** (Figura 12 de Russell, 1992; Russell and Vaisberg, 1983).

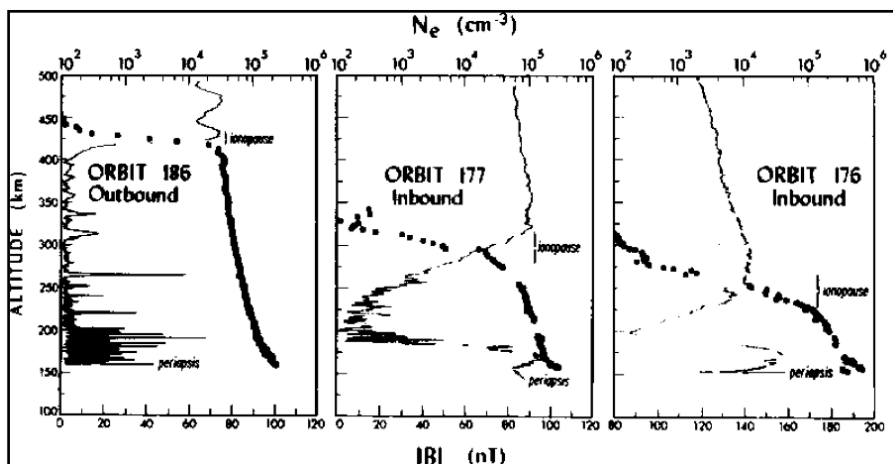


Figura 5-1. Datos obtenidos de la misión PVO (Pioneer Venus Orbiter) para tres órbitas diferentes (Figura 12 de Russell et al. 1992). En cada uno de los tres paneles, la línea continua (escala inferior) representa la intensidad medida del campo magnético, mientras que los puntos corresponden a los perfiles de densidad electrónica (escala superior).

En esta figura se muestran los valores registrados durante la misión PVO en Venus, gracias a los cuales se aprecia una clara variación de la altura de escala del plasma, H_p , bajo cambios en el viento solar incidente. Dicha altura de escala se define como la variación de altura en la atmósfera, en la que la presión atmosférica disminuye en un factor e . Éste parámetro resulta ser la llave en la exploración de la parte más alta de la ionosfera (*topside*). Para el caso mencionado de Venus (Figura 5-1) se ha comprobado cómo el comportamiento de la ionosfera se va modificando en función del campo magnético. De izquierda a derecha, Russell. (1992) muestra tres paneles con la evolución y diferencias en la ionosfera para valores de campo magnético creciente. Debido al balance de presiones en la parte superior de la ionosfera (por encima de los 200 km) aparece una clara compresión de la misma a medida que los valores de campo magnético aumentan (60-110) nT. A la vista de dicha figura se puede comprobar cómo a medida que el campo magnético es más intenso en la parte alta de la ionosfera, más penetra en la misma. Además de la compresión se aprecia cómo los perfiles de densidad electrónica mostrados varían considerablemente en la forma por la presencia de un campo magnético intenso.

En el caso de Marte, este estudio no habría podido ser desarrollado ya que no existían medidas de campo magnético a diferentes altitudes, así como perfiles de densidad electrónica de forma simultánea. Sin embargo, existen trabajos previos en los que se pueden encontrar pistas del problema descrito. Un ejemplo de ello viene recogido en los trabajos de Withers et al. (2012) y Mendillo et al. (2006) donde aparecen diferentes características en los perfiles analizados, así como signos de compresión ionosférica tal y como se recoge en (Opgenoorth et al., 2013). A pesar de los estudios mencionados ninguno de ellos emplea datos *in situ* de campo magnético, dado que ningún instrumento hasta la fecha los ha registrado. A pesar de ello a lo largo de esta Tesis se describirá el estudio realizado a partir de medidas directas de densidad electrónica (datos proporcionados por el radar MARSIS) así como de valores de campo magnético (obtenidos de forma indirecta a partir de los ionogramas).

5.2. Campo magnético a partir de los datos de MARSIS

Los datos utilizados en esta sección proceden del mencionado radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express. A continuación se describirá en detalles las características de los datos utilizados así como la metodología empleada y los resultados obtenidos.

5.2.1. Datos del radar MARSIS

Tal y como se describió en el Capítulo 2 una forma de representar los datos registrados por el radar MARSIS es en forma de ionograma (Figura 2-4 del Capítulo 2), es decir, representando el retardo en tiempos de la señal frente a la frecuencia emitida. La representación final de las frecuencias utilizadas por MARSIS a lo largo del tiempo para cada órbita se conoce como espectrograma. Aplicando el procedimiento de inversión a los ecos ionosféricos (Sánchez-Cano et al., 2012; Morgan et al., 2013), es posible obtener el perfil vertical de densidad electrónica correspondiente. Debido a las configuraciones intrínsecas de la misión, el radar MARSIS sólo realiza medidas en altitudes inferiores a 1200 km (Gurnet et al., 2005), registrando típicamente 300 ionogramas por órbita (<http://www.rsd.esa.int/psa>). En los ionogramas tomados en las proximidades del periapsis es habitual encontrar a diferentes frecuencias los denominados

armónicos de oscilación del plasma (líneas verticales, [Figura 2-4](#)). Sin embargo la información más valiosa, presente en los ionogramas, para este trabajo, la proporcionan los ecos horizontales correspondientes a los electrones ciclotrónicos (descrito en [Figura 2-4](#)). A partir de dichos ecos y según lo descrito en la Sección 2.2.2 es posible obtener los valores de campo magnético obtenidos a la altura de la nave. Hay que tener en cuenta que dichos valores se corresponden con valores en módulo, de los que no resulta posible obtener las componentes del mismo. Además, hay que tener en cuenta que estos valores resultan una medida compuesta del valor del campo magnético cortical más el valor del campo magnético en la ionosfera.

Autores como Gurnett et al. (2008) o Akalin et al. (2010) describen dicha fenomenología. Para calcular los valores de campo magnético emplean reglas electrónicas para estimar el número de líneas horizontales en un periodo concreto de tiempo. A la hora de contabilizarlas, se selecciona el punto medio de cada una de estas líneas en cada ionograma para un intervalo concreto. Sin embargo, en este trabajo se ha estimado este valor a mano, con la idea de seleccionar únicamente aquellos periodos de tiempo en los que la intensidad del eco es mayor. Por ello, se ha contabilizado el número de líneas en un intervalo comprendido desde la parte superior de la primera línea hasta la parte inferior de la última. En este sentido, y para validar la metodología empleada, se ha realizado una validación previa entre los valores obtenidos por Gurnett et al. (2008) y los obtenidos en esta Tesis. Se ha seleccionado la órbita 2018 (10 de agosto de 2005) del radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express y se han analizado los ionogramas en los que queda asegurada la presencia tanto de plasma (altitud menor o alrededor de 600 km) como de los ecos ciclotrónicos. En el Anexo III aparecen resumidos a modo de tabla, para cada uno de los ionogramas las principales características de los mismos: hora (Hor, hora de registro del correspondiente ionograma (hh:mm:ss.sss)), altura de la nave (zsc, (km)), intervalo (Int, desde parte superior de la primera línea hasta la parte inferior de la última), número de líneas (Num, número de líneas en el intervalo seleccionado), periodo (T, Int/Num (ms)), campo magnético (B_{MEX} , valor del campo magnético a la altura de la nave calculado a partir de la ecuación 5 (nT)), latitud (lat, (°)), longitud (lon, (°)) y ángulo cenital solar (SZA, (°)). Los valores más representativos de la órbita aparecen resumidos en la [Tabla 5-1](#).

Tabla 5-1. Resumen de los parámetros más característicos de la órbita 2018 de la misión Mars Express.

Número órbita Mars Express	2018
Latitud, Lat (°)	(-34 a 36) °
Longitud, Lon (°)	(194.4 a 194.5)°
Altitud de la nave (km)	(294 a 610) km
Campo magnético medido a la altura de la nave (nT)	(17.87 a 171.78) nT
Ángulo cenital solar (°)	(47.57 a 86.79) °

Para validar la metodología empleada en esta Tesis, en la **Figura 5-2** se han representado los valores de campo magnético obtenidos por Cain et al. (2003), varios valores seleccionados aleatoriamente del artículo de Gurnett et al. (2007), así como los obtenidos a partir de los datos de MARSIS (**Tabla AIII-1**).

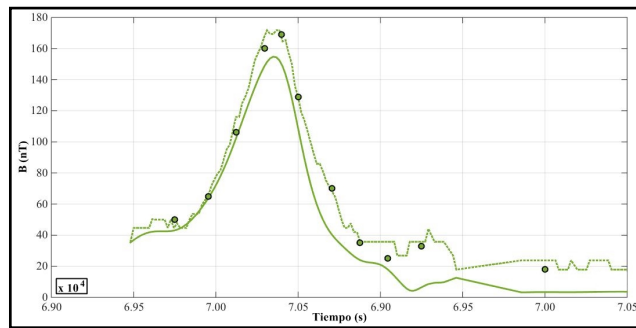


Figura 5-2. Comparación de los valores de campo magnético de la órbita 2018 de la misión MEX. La línea continua, corresponde con los valores de campo magnético calculados a partir del modelo de Cain et al. (2003), la discontinua son los valores de B_{MEX} , mientras que los puntos, corresponden con los valores obtenidos por Gurnett et al. (2008).

A la vista de los resultados de la **Figura 5-2** se puede comprobar cómo la técnica empleada para calcular los valores de campo magnético resulta perfectamente adecuada, ya que existe una reproducción casi perfecta de los resultados obtenidos por los trabajos de los autores mencionados. Una vez confirmada la técnica se continuó con el procesado de los datos.

5.2.2. Procesado de los datos

Como se ha mencionado anteriormente el objetivo de esta Sección del trabajo consiste en evaluar el efecto de un campo magnético inducido sobre la ionosfera. Para ello se han seleccionado dos órbitas (3151, 9316) siguiendo los siguientes criterios: (1) ambas órbitas deben localizarse en la misma región geográfica que se caracterice por la carencia de anomalías magnéticas significativas; (2) en una de las órbitas debe ser posible identificar los ecos ciclotrónicos en cada ionograma mientras que en la otra no; (3) para ambas órbitas y con el objetivo de procesar los ionogramas debe ser identificable los armónicos del plasma. Con el objetivo de completar el trabajo se seleccionó además una tercera órbita (6788), la cual se encuentra en una ubicación completamente diferente ya que se sitúa sobre una región con fuertes anomalías magnéticas (Figura 5-3). El objetivo de esta tercera órbita es comprobar si las anomalías corticales influyen en los resultados obtenidos respecto de las otras dos órbitas.

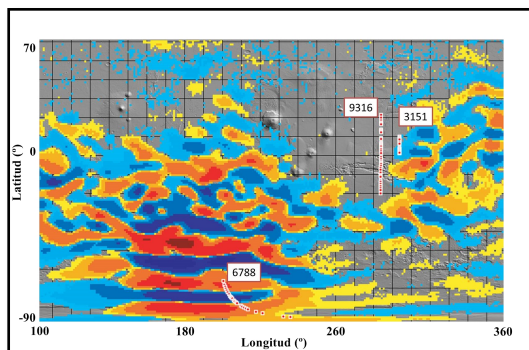


Figura 5-3. Mapa de la superficie marciana. Las regiones sombreadas, desde el azul oscuro hasta el granate, corresponden con las anomalías magnéticas (nT) obtenidas a partir de JMARS (Java Mission-planning and Analysis for Remote Sensing). Las trazas en color rojo corresponden con las órbitas descritas por MEX.

En la **Tabla 5-2** se han resumido los parámetros más representativos y relevantes para el trabajo de cada órbita.

Tabla 5-2. Principales características de las órbitas 9316, 3151 y 6788 de la misión MEX.

Número órbita Mars Express	9316	3151	6788
Fecha (dd/mm/aaaa)	19/04/2011	23/06/2006	17/04/2009
Distancia heliocéntrica (UA)	1.39	1.67	1.38
Ls (°)	276.8	70.2	248.1
F10.7 (sfu, en 1 UA)	111	72	70
Latitud (°)	1.1 a 21.4	-0.1 a 33.1	-64.5 a -82.6
Longitud (°)	284	294	200 a 236
Altitud de la nave (km)	344 a 372	309 a 359	308 a 369
Ángulo cenital solar (°)	80 a 88	43 a 55	74 a 90
Campo magnético medido a la altura de la nave (nT)	0	45 a 62	30 a 89
Campo magnético a partir del modelo de Cain et al., 2003 (nT)	1.5 a 3.2	2 a 9	19 a 76
Densidad electrónica local ($\cdot 10^9$ e/m ³)	1 a 5	0.5 a 3	0.8 a 3.7
Altura del pico (km)	130 a 160	110 a 120	136 a 163
Densidad electrónica en el pico ($\cdot 10^{10}$ e/m ³)	5 a 9	11 a 13	4 a 9
Contenido total de electrones, TEC ($\cdot 10^{16}$ e/m ³)	0.2 a 0.6	0.4 a 0.6	2 a 5

A la vista de los valores de la [Tabla 5-2](#) se puede comprobar cómo dos de las órbitas analizadas (9316 y 3151) tienen un rango de latitudes en común, lo cual nos permitirá realizar una buena comparación entre los resultados. Además, los valores de campo magnético a la altura de la nave son diferentes para cada una de las órbitas, siendo de 0 nT en el caso de la órbita 9316, mientras que para las otras dos los valores oscilan entre los 30 nT y 80 nT. Los valores de campo magnético simulados a partir del modelo de Cain et al, (2003), proporcionan valores para el campo magnético cortical entre los (1-76) nT. A pesar de que se alcanzan en algunas regiones del planeta valores de en torno a 10^3 nT éstos valores son mucho menores que los que se registran en la Tierra, que pueden llegar a los 60000 nT.

Para realizar el estudio en detalle de dichas órbitas, además de los datos proporcionados por la [Tabla 5-2](#), a continuación se muestran los espectrogramas de las tres órbitas seleccionadas ([Figura 5-4](#)) a partir de los cuales se obtiene una visión global de la ionosfera marciana.

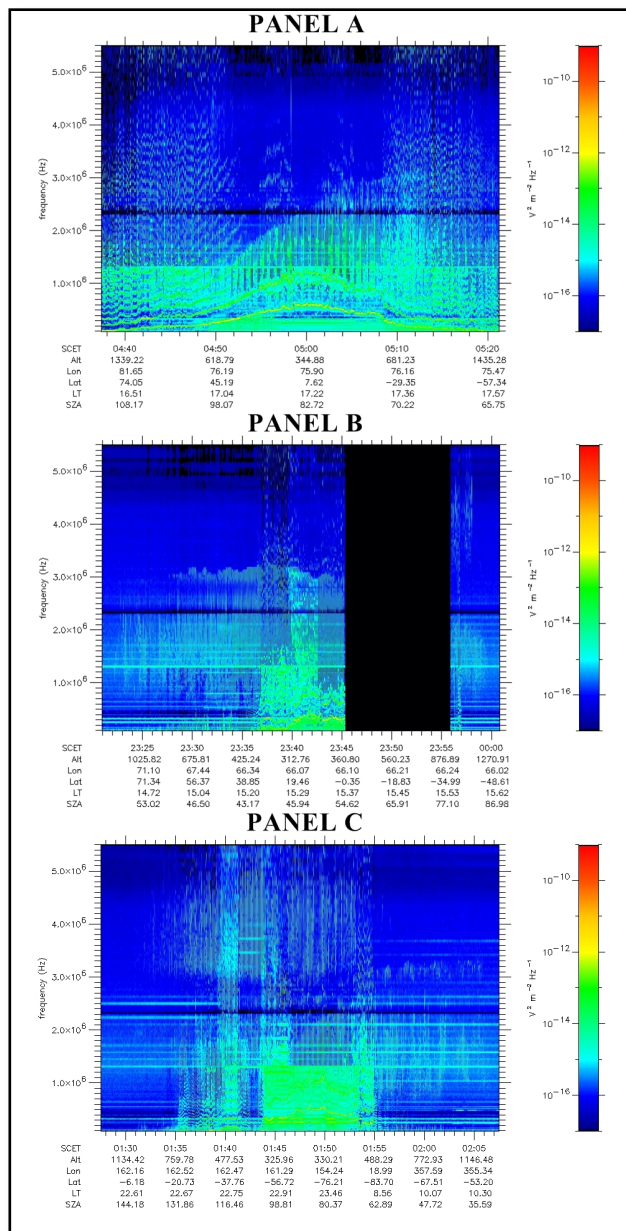


Figura 5-4. Espectrogramas obtenidos a partir de MARSIS para las tres órbitas seleccionadas: el panel A corresponde a la órbita 9316 (sin campo magnético inducido), el panel B a la órbita 3151 (con presencia de campo magnético inducido) y el panel C la órbita 6788 (con presencia de campo magnético inducido y campo magnético en la superficie).

El primer paso para analizar las dos órbitas que se encuentran en la misma región de Marte (9316 y 3151), consistió en obtener los perfiles de densidad electrónica. En este proceso la mayor limitación es la altitud de la nave. Ya que los perfiles correspondientes al *topside* sólo se pueden obtener en el caso de que la densidad electrónica de plasma esté presente en el ionograma. Por ello la nave tiene que encontrarse por debajo de la ionopausa. Para el caso de la órbita 3151 estos requisitos pueden resumirse en: (1) los AIS se pueden analizar para alturas muy bajas de MEX, y (2) en los correspondientes ionogramas los ecos ciclotrónicos deben estar registrados para poder calcular los valores de campo magnético. De este modo después del procesado final de cada uno de los ionogramas se obtendrá un perfil vertical del *topside* por cada uno de estos.

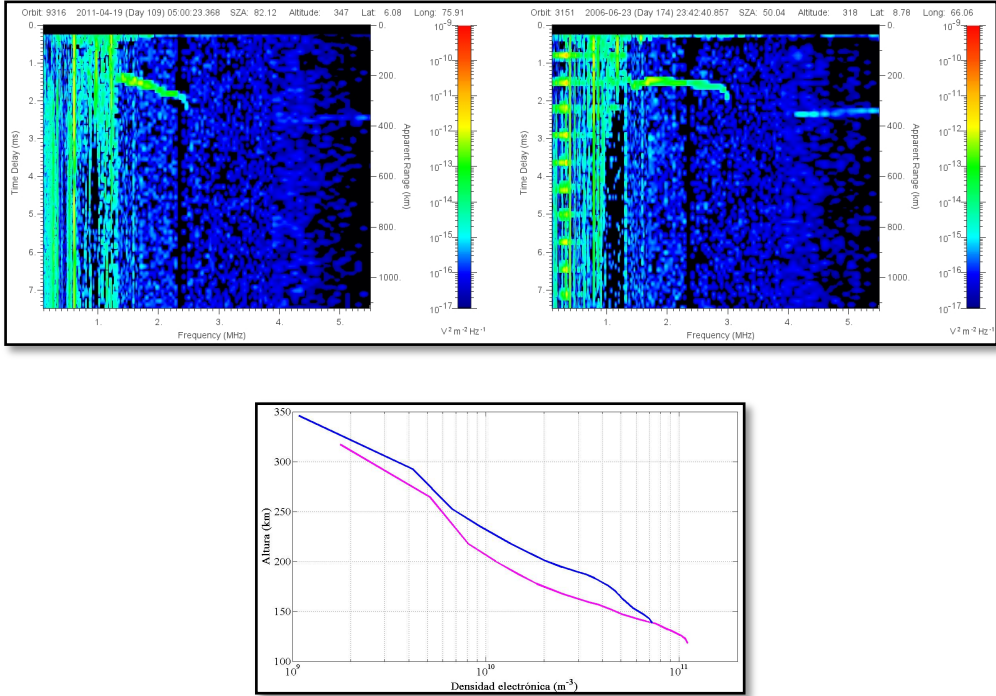


Figura 5-5. Panel superior, ejemplo de dos ionogramas característicos de las órbitas 9316 (izquierda) y 3151 (derecha) de la misión MEX. Ambos casos corresponden con el pericentro de las órbitas. Los ecos horizontales que se aprecian en la figura de la derecha están producidos por la presencia de un campo magnético a la altura de la nave. El panel inferior corresponden con los perfiles de densidad electrónica asociados a los ionogramas anteriores.

En la **Figura 5-5** se muestra un ejemplo tanto de los ionogramas característicos de cada órbita como los correspondientes perfiles de densidad electrónica más representativos. En el Anexo IV puede encontrarse el conjunto global de todos los perfiles obtenidos para la órbita 3151. El mismo análisis se ha practicado para las otras dos órbitas, 9316 y 6788, en los Anexos V, VI respectivamente. Por otra parte, los valores de campo magnético se han calculado según lo descrito por Akalin et al. (2010) para cada una de las tres órbitas, a partir del procedimiento y de las ecuaciones descritas en la Sección 2.2.2.

En primer lugar se han representado (**Figura 5-6**) los valores más característicos (**Tabla 5-2**) de cada órbita (3151 y 9316) en función del ángulo cenital solar con el fin de analizar las principales entre ambas .

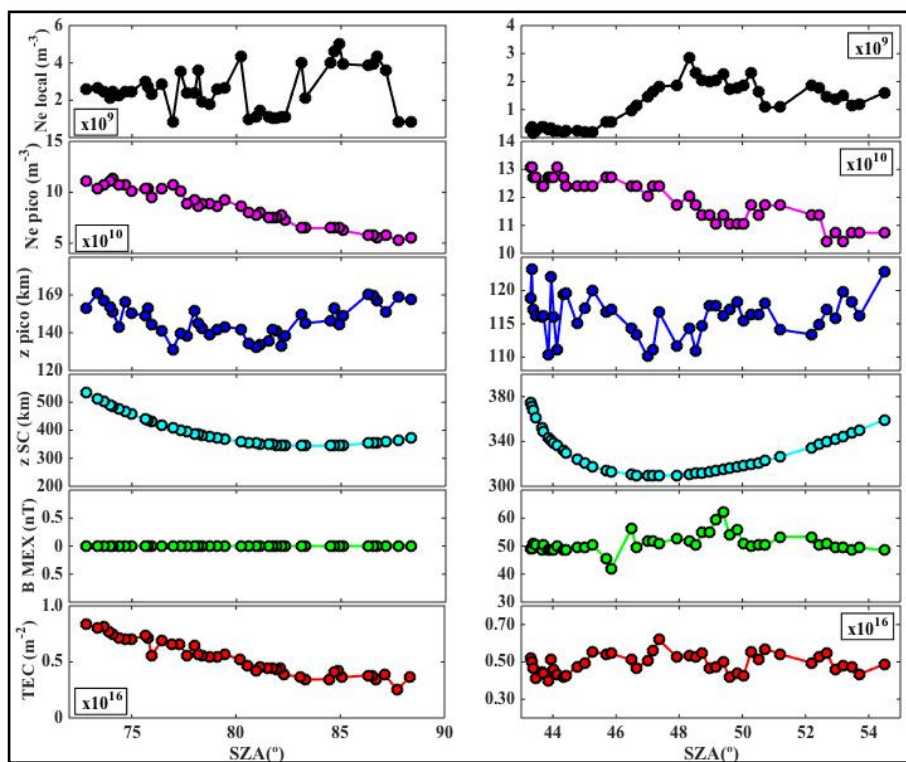


Figura 5-6. Series de las principales características para las órbitas 9316 y 3151 de la misión MEX. De arriba a abajo los paneles corresponden a: densidad electrónica local y en el pico, altura del pico y de la nave, valor del campo magnético obtenido por MARSIS y valor del contenido total de electrones.

Esta **Figura 5-6** recoge parte de la información más relevante y descriptiva de las órbitas seleccionadas (Ramírez-Nicolás et al., 2015b). Los parámetros representados son: la densidad electrónica medida a la altura de la nave ($n_{e\ sc}$) y en el pico principal del perfil (máximo de densidad electrónica, $n_{e\ pico}$), la altitud del pico principal ($z\ pico$) y de la nave $z\ sc$, el campo magnético medido por el radar MARSIS a la altura de la nave (B_{MEX}), el contenido total de electrones (TEC , densidad electrónica integrada entre el máximo de densidad electrónica y la altura de la nave). En principio el comportamiento de ambas órbitas debería resultar similar pero, sin embargo, a la vista de los resultados de la **Figura 5-6** se observa una diferencia clara entre ambas. Los valores de densidad electrónica local, en la órbita 9316 (sin campo magnético) tienen un comportamiento bastante aleatorio mientras que en la 3151 (con campo magnético) siguen una progresión bien definida para series de tiempo completas. Por otra parte, a pesar de los valores de SZA para cada una de las órbitas los valores de densidad electrónica local son considerablemente menores en la órbita 3151. Otro aspecto reseñable es la diferencia de aproximadamente 20 km que existe entre los valores de la altura para el máximo de densidad electrónica, siendo inferior en el caso de la órbita con campo magnético, 3151, mostrando claramente una compresión en la ionosfera. Típicamente dicho valor se sitúa en torno a los 130 km (Paetzold et al., 2005; Mendillo et al., 2011) para los valores de SZA referidos Sin embargo observamos cómo en el caso de la órbita 3151 este valor oscila entre aproximadamente los 110 km y los 120 km, hecho que proporciona una prueba más de la compresión en ese día. Por el contrario, en la órbita 9316 podemos encontrar un comportamiento que se ajusta mucho más a lo esperado. En cuanto al comportamiento observado en los valores de densidad electrónica en el pico (valores máximos), presentan un comportamiento similar en ambos casos, mostrando un decrecimiento en los valores a medida que aumentan el SZA. Sin embargo, hay que destacar que en la órbita 3151 este decrecimiento se hace más pronunciado en el periodo en el que la densidad electrónica a la altura de la nave así como el campo magnético medido son más fuertes. Por último, en relación con el TEC , podemos encontrar diferencias evidentes entre ambas órbitas. En primera aproximación, se puede comprobar cómo la órbita 3151 tiene un menor contenido de electrones libres en

el *topside* en comparación con el valor obtenido para la órbita 9316 (mayor SZA). Este hecho resulta contrario a lo esperado teniendo en cuenta los valores de SZA para cada órbita. Con objeto de descartar que estas diferencias se deban al efecto de la distancia heliocéntrica, dichos valores se han comparado con un modelo empírico (Sánchez-Cano et al., 2013), resultando que las diferencias entre los valores esperados y obtenidos de TEC son insignificantes para la órbita 9316, mientras que para la órbita 3151 las diferencias alcanzan hasta los $0.3 \cdot 10^{16} \text{ e}^-/\text{m}^2$ para un valor de ángulo cenital solar de 50° . De este modo quedan descartadas las discrepancias orbitales.

En cuanto a la tercera órbita estudiada, 6788, se verá en la Subsección 5.4.2 las características más relevantes de la misma así como los resultados derivados.

5.3. Metodología: cálculo de la altura de escala, H_p , la altura de transición, A_T y la temperatura, T_p .

5.3.1. Estimación de la altura de escala del plasma

Tal y como se ha comentado anteriormente, la altura de escala del plasma es uno de los parámetros fundamentales de dar una visión del estado de la ionosfera. En la literatura se puede encontrar que este parámetro se ha utilizado con el fin de describir la estructura de la ionosfera a partir de la caracterización de la forma de los perfiles verticales de densidad electrónica (Kelly, 2009). Este parámetro, H_p , viene definido por la siguiente expresión

$$\frac{1}{H_p} = -\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dz} \quad 5.1$$

donde n_e es la densidad electrónica y z la altura. Si consideramos una situación de equilibrio hidrostático y temperatura constante la expresión de la altura de escala del plasma se ve considerablemente simplificada dependiendo

fundamentalmente de la temperatura y de la masa del medio pudiéndose escribir como:

$$H_p = \frac{k_B T_p}{mg} \quad 5.2$$

siendo k_B la constante de Boltzmann ($1.3806504 \cdot 10^{-23}$ J/K), T_p es la temperatura del medio, m la masa y g el valor de la gravedad.

La ionosfera marciana es un plasma caracterizado por diferentes regímenes, los cuales tienen un fuerte impacto sobre la altura de escala del plasma. Básicamente se distinguen dos regiones diferentes:

- La primera región correspondería a la zona más alta de la ionosfera en la cual podemos encontrar en equilibrio hidrostático al plasma. De este modo la ecuación (5.1) se puede equiparar a la ecuación (5.2). En dicha expresión T_p correspondería a la temperatura del plasma y m la masa promediada de los iones (donde O_2^+ es la especie predominante en la principal región de ionización).
- La segunda, es una región dominada químicamente donde la tasa de producción de iones varía según la concentración de partículas neutras justo por encima del pico de producción. Considerando que la velocidad de la reacción de recombinación entre iones y electrones es de segundo orden en la concentración de electrones, la altura de escala que se obtiene es la mitad del valor de la altura de escala que se obtendría de la ecuación (5.2) para las partículas neutras, siendo m la masa del CO_2 (componente mayoritario en la atmósfera marciana) y T_p la temperatura de las partículas neutras.

Las alturas de escala descritas anteriormente tienen significados físicos diferentes, por lo que sus valores también lo son. Sin embargo el valor de la altura de escala del plasma es siempre mayor que el de la neutra. Por este

motivo, ambos parámetros permiten obtener los valores de la temperatura, el comportamiento de las partículas neutras y del plasma así como la respuesta al viento solar.

Por otra parte, la altura de escala depende directamente de la altitud tal y como veremos en los resultados obtenidos. En este trabajo se ha utilizado la H_p para estudiar y analizar el efecto del campo magnético inducido por el viento solar en la ionosfera marciana. Para ello se ha estimado dicho valor a partir de los perfiles de densidad electrónica.

5.3.2. Estimación de la altura de transición para el campo magnético inducido

Otro aspecto importante de la interacción entre la atmósfera y el viento solar es la penetración (o no) del campo magnético inducido en el plasma hasta una cierta altura, conocida como altura de transición (AT). Hasta la fecha, en los trabajos realizados se han propuesto simulaciones numéricas cuyos resultados proporcionan para valores de campo magnético inducido de (30-60) nT, alturas de transición alrededor de 150 km (Shinagawa and Cravens, 1989; Witasse, 2000). Esta altura de transición marca un cambio de comportamiento en la ionosfera, mostrando básicamente la altura a partir de la cual la ionosfera no se rige por procesos fotoquímicos puros. Por encima de esta altura los procesos dinámicos dependen fuertemente de la penetración del campo magnético inducido. Para establecer dicha altura en cada una de las órbitas, primero se realizó un ajuste de los valores que se encuentran por encima del máximo de densidad electrónica. Segundo, se realizó un análisis visual para identificar en cada perfil el punto en el que se aprecia un cambio en la pendiente. Por último, se calculó la desviación existente entre el resto de los puntos del perfil (que no han sido tenidos en cuenta para el ajuste de la parte fotoquímica) y el ajuste realizado. Comparando los valores obtenidos con lo percibido visualmente, se ha podido establecer que para desviaciones de los valores superiores al 7 % . El comportamiento deja de ser fotoquímico. De esta forma quedan determinados dos puntos característicos del perfil, el último valor que se ajusta a la recta

(h_{last}) y el primero que no lo hace (h_{first}) , pudiendo establecer así la altura de transición como un punto entre (h_{last}) y (h_{first}) (Ramírez-Nicolás et al., 2015b). Resulta imposible determinar la altura exacta a la que se encuentra ya que en realidad no hablamos de un punto concreto en el espacio, sino de una región. Por este motivo en esta Tesis se propone como altura de transición la altura estimada como el punto medio entre (h_{last}) y (h_{first}) .

5.3.3. Balance de presiones: Valores de campo magnético

Tal y como se ha descrito anteriormente tanto la altura de escala como la altura de transición son dos muy buenos indicadores del estado de la ionosfera, y en consecuencia de la compresión del plasma. Sin embargo para dar un paso más en el análisis del efecto del viento solar (campo magnético inducido) sobre la ionosfera (Zhang and Luhmann, 1992), se ha analizado el balance de presiones de la órbita 3151 para obtener una visión más clara de dicha interacción. El objetivo de este análisis es el de confirmar que el campo magnético puede penetrar en la ionosfera hasta la altura de transición. En un principio, el campo magnético inducido puede penetrar hasta una cierta altura en la ionosfera en la que la presión magnética se iguala a la presión térmica del plasma. Por debajo de esta altura la presión térmica es mayor que la presión magnética por lo que la intensidad del campo magnético disminuye hasta cero debido al efecto de difusión. En esta Tesis se emplea el balance entre las presiones con el objetivo de obtener valores razonables de campo magnético o temperaturas.

Para ello partimos, por un lado, de la presión del plasma que viene dada por

$$P_p = n_e k_B T_p \quad 5.3$$

donde n_e es la densidad electrónica, k_B la constante de Boltzmann y T_p la temperatura del plasma. Y por otro lado la presión magnética sigue la expresión

$$P_B = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad 5.4$$

en la que B es la intensidad del campo magnético y μ_0 la permeabilidad magnética del vacío. Asumiendo el equilibrio de presiones la ecuación (5.3) puede igualarse a la ecuación (5.4). Si además tenemos en cuenta la ecuación del plasma (Ec. 5.1) para la población de plasma en la región encima del pico principal (máximo de densidad electrónica), la intensidad del campo magnético puede estimarse según:

$$B = \sqrt{2\mu_0 m_p g n_e H_p} \quad 5.5$$

En este caso m_p es la masa promedio de iones a la altura de transición. En el caso estudiado se ha asumido que la composición a dicha altura consta de un 90% de O_2^+ y un 10% de CO_2^+ (e.g. Shinagawa and Cravens, 1989). Por otro lado, g corresponde con el valor de la gravedad a la altura señalada. Dado que se ha asumido el equilibrio de presiones, hay que tener en cuenta que esta hipótesis no es válida por debajo de la altura de transición. De este modo comprobamos cómo resulta posible obtener los valores de campo magnético a la altura de transición a partir de la altura de escala.

5.3.4. Balance de Presiones: Estimación de la temperatura

A partir de lo descrito en la Subsección (5.3.4) es posible obtener un resultado más a partir del balance de presiones. Además de los valores de campo magnético a la altura de transición es posible obtener una estimación de los valores de la temperatura del plasma a partir del balance de presiones y de los valores de campo magnético deducidos a partir de los ionogramas. Sin embargo hay que resaltar que se trata de tan sólo una estimación ya que los valores que disponemos de campo magnético son a la altura de la nave y no a la altura de transición. A pesar de esta salvedad, en la siguiente sección se presentarán los

resultados obtenidos, lo cuales se encuentran en un rango más que aceptable al compararlos con los alcanzados por otros autores.

Con este propósito se ha partido de nuevo del balance de presiones, sin embargo en esta ocasión la variable de interés es la temperatura del plasma. Igualando las ecuaciones (5.3) y (5.4), y despejando el valor de la temperatura del plasma se obtiene

$$T_p = \frac{B^2}{2\mu_0 n_e k_B} \quad 5.6$$

donde T_p es la temperatura del plasma y corresponde con la sumas de las temperaturas de los iones y electrones $T_p = (T_i + T_e)$.

A partir de los valores del campo magnético obtenidos por el radar MARSIS se ha obtenido el valor de la temperatura del plasma a la altura de la nave. De estos resultados, como veremos en la siguiente sección, se pueden obtener aproximadamente los valores del plasma a la altura de transición.

5.4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados más significativos obtenidos de los diferentes análisis realizados. Por un lado se presentará una comparativa de las dos órbitas ubicadas aproximadamente en la misma región de Marte (9316 y 3151) con el objetivo de encontrar evidencias de la compresión de la ionosfera por la acción de un campo magnético inducido (viento solar). Así mismo se mostrarán los resultados derivados del balance de presiones a la altura de transición y su validación con los resultados obtenidos a partir de modelos numéricos.

Por otra parte se presentan los resultados para la órbita (6788) que además de registrar valores de campo magnético a la altura de la nave, se caracteriza por poseer una contribución de anomalías magnéticas corticales.

5.4.1. Comparativa órbita 3151 y 9316

Los datos tomados por el radar MARSIS se adquirieron para ambas órbitas durante el día para SZA altos. Para cada una de las dos órbitas se han calculado los valores de la altura de escala a partir de los ajustes lineales realizados a los perfiles de densidad electrónica (Anexo IV y Anexo V). Para cada una de las órbitas analizadas se ha establecido una altura típica a partir de la cual la ionosfera no está controlada por procesos fotoquímicos, la cual corresponde típicamente a $\sim (20-30)$ km por encima del pico de densidad máxima. Comparando los resultados, puede apreciarse la diferencia entre ambas órbitas. De forma particular hay que destacar las cinco regiones claramente diferenciadas que aparecen en la órbita 3151:

∞ **Régimen 1: Ionogramas 125-141 (latitudes entre 33.1° a 25.3° N)**

- Sin compresión ionosférica clara (leve compresión en los perfiles 132-133)
- Equilibrio difusivo a altas altitudes
- Sin efecto aparente de un campo magnético inducido

∞ **Régimen 2: Ionogramas 144-152 (latitudes entre 23.8° a 19.8° N)**

- Como en la órbita 9316 las densidades electrónicas siguen un valor de altura de escala constante

∞ **Régimen 3: Ionogramas 156-173 (latitudes entre 17.8° a 9.3° N):**

- Compresión clara del plasma
- Altura de transición fácilmente identificable

∞ **Régimen 4: Ionogramas 174-177 (latitudes entre 8.8° a 7.3° N):**

- Las densidades electrónicas siguen un valor constante de la altura de escala.

∞ **Régimen 5: Ionogramas 179-192 (latitudes entre 6.3° a -0.13° N):**

- Compresión en el plasma, aunque menor amplitud que en el rango de ionogramas entre 156-173.

A la vista de dicha descripción resulta evidente como en la órbita 3151 la ionosfera aparece más comprimida que en la 9316.

Seguidamente se ha procedido a realizar una comparación entre ambas órbitas. Sin embargo para poder realizarla se ha procedido a normalizar los perfiles ya que según la descripción de cada órbita (Tabla 5-2) las medidas no se han realizado bajo las mismas condiciones, ni en el mismo instante. Con este propósito, los valores de densidad electrónica de cada perfil se han normalizado por el valor de densidad en el pico (máximo) correspondiente, mientras que la altura (z) normalizada sigue la siguiente expresión:

$$\frac{z(dato) - z(pico)}{H_p} \quad 5.7$$

En la Figura 5-7 se muestran los resultados, representando los valores de las alturas normalizadas en eje de ordenadas, mientras que los valores de densidad normalizados aparecen en las abscisas. En la figura se muestran tres perfiles correspondientes a la órbita 3151 y uno de la 9316, con el objetivo de mostrar de forma clara la discusión. Teóricamente, los perfiles de densidad electrónica con un valor de altura de escala constante deben seguir la línea negra discontinua de puntos. Se han seleccionado varios perfiles para cada órbita. El perfil 206 de la órbita 9316 (línea discontinua azul) tiene un comportamiento muy próximo a la línea teórica. Por el contrario los tres perfiles seleccionados de la órbita 3151: 169 (línea continua puntos rosa), 177 (línea discontinua rosa) y 186 (línea discontinua de puntos rosas) tienen un comportamiento diferente.

A la vista de los resultados de la Figura 5-7, el perfil 169 corresponde al régimen 3, por lo que presenta una clara compresión, quedando de manifiesto en el rango 1-3 para la altura normalizada. Para el perfil 177 (régimen 4) podemos apreciar oscilaciones en torno a la línea discontinua teórica mientras que para el perfil 186 (régimen 5) vuelve a reflejar el comportamiento de una ionosfera comprimida.

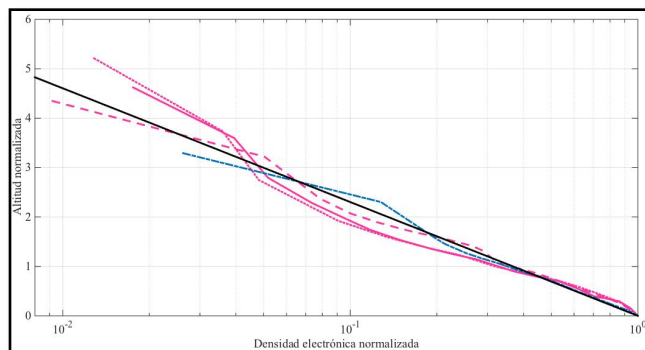


Figura 5-7. Distribución de densidad electrónica normalizada para las órbitas 3151 y 9316. En rosa se muestran los resultados correspondientes a los perfiles 169, 186 y 177 (órbita 3151), mientras que en azul aparecen los resultantes del perfil 206 (órbita 9316). La línea negra muestra el comportamiento del perfil de densidad normalizado para un valor de altura de escala del plasma constante.

Gracias a esta figura (Figura 5-7) se ha podido establecer el área de máxima influencia del campo magnético inducido sobre la ionosfera marciana, ubicándose en el rango de alturas normalizadas comprendidos entre 1-3 por encima del pico (Ramírez-Nicolás et al., 2015b).

Todos los valores de altura de escala del plasma se han calculado siguiendo la metodología descrita en la Subsección 5.3.1. Se ha realizado una comparación de las diferencias que existen entre los valores calculados para cada una de las órbitas analizadas (9316 y 3151). Para poder compararlas, lo más rigurosamente posible, se ha seleccionado únicamente el mismo rango de latitudes.

Para estas dos órbitas, en la Figura 5-8 se muestran los resultados de los valores de la altura de escala del plasma calculados para la región fotoquímica (valores de altura de escala del plasma más próximos al pico correspondiente al máximo de densidad electrónica) de cada órbita (9316 círculos negros; 3151 círculos rosas) en función de la latitud.

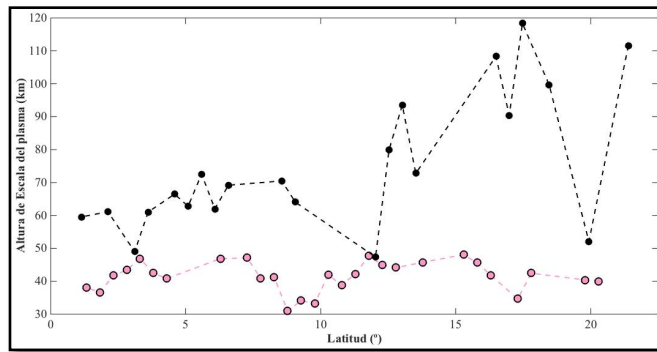


Figura 5-8. Valores de la altura de escala del plasma calculados para la zona controlada fotoquímicamente de la ionosfera en función de la latitud. Los valores para la órbita 9316 aparecen en negro, mientras que en rosa se han representado los correspondientes a la órbita 3151.

A la vista de los resultados se puede apreciar cómo los valores de altura de escala del plasma son mucho menores en el caso magnetizado (órbita 3151), resultando un valor en torno a 40 km para dicha órbita (círculos rosas) mientras que alcanza valores entre (50-120) km para la órbita 9316 (círculos negros). Tal y como se ha mencionado anteriormente, se puede identificar una región de fuerte compresión, de forma clara, que corresponde con lo definido en la régimen 3. Los perfiles asociados a dicho régimen se caracterizan por dos alturas de escalas:

- * H_p : Altura de escala del plasma calculada justo por encima del pico en la región dominada por procesos fotoquímicos.
- * H_{pB} : Altura de escala del plasma a alturas más elevadas en la región controlada por el campo magnético inducido.

Cada uno de dichos valores se ha calculado para todos los perfiles de la órbita 3151. Como ejemplo, en la Figura 5-9 se muestran las dos alturas de escala del perfil número 169: la regida por procesos fotoquímicos (rosa) y la que se controla por el campo magnético inducido (azul).

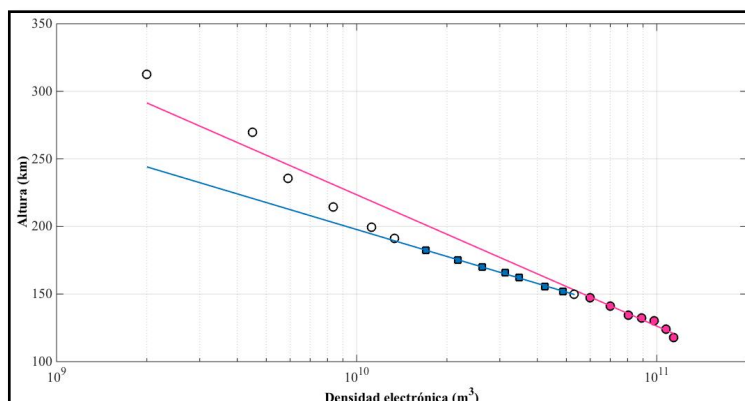


Figura 5-9. Perfil de densidad electrónica número 169 de la órbita 3151 de Mars Express. Los puntos rosas pertenecen al la región de la ionosfera controlada por procesos fotoquímicos. Los cuadrados azules son los puntos de densidad electrónica que corresponden con la región en la ionosfera regida por procesos de transporte y campo magnético. Por último, los círculos blancos representan la región de la ionosfera controlada por procesos de transporte sin influencia del campo magnético.

Los resultados muestran que la región controlada por procesos fotoquímicos tiene, para este perfil, una altura de escala característica de 42 km, mientras que para la región bajo la influencia del campo magnético inducido este valor disminuye hasta los 29 km. De este modo se aprecia claramente la influencia del efecto del campo magnético sobre la ionosfera marciana.

Con el propósito de comparar las diferencias existentes entre los dos valores de la altura de escala del plasma a lo largo de una órbita (3151) se han representado estos valores (Figura 5-10) para todos los perfiles correspondientes al régimen 3, ya que corresponde con el tramo donde dicha compresión se puede observar de una forma más clara.

En la Figura 5-10 se muestra la evolución de ambas alturas de escalas frente al ángulo cenital solar, encontrándose que los valores de la altura de escala del plasma H_{pB} muestran siempre valores inferiores a H_p , generalmente 10 km menos.

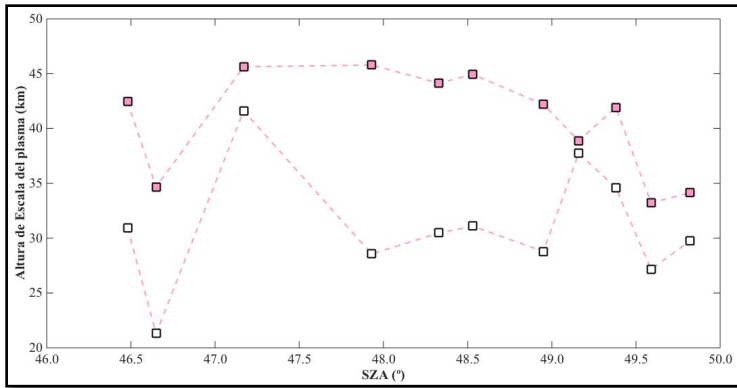


Figura 5-10. Valores de las alturas de escala identificadas para algunos perfiles de la órbita 3151 en función del ángulo cenital solar. Los cuadrados rosas corresponden a la altura de escala calculada para la parte más próxima al máximo de densidad electrónica (fotoquímica), mientras que los blancos corresponden a una ionosfera bajo la acción de un campo magnético inducido.

En la **Tabla 5-3** quedan resumidos los valores característicos de la altura de escala para las dos órbitas analizadas en esta sección.

Tabla 5-3. Valores característicos correspondientes a la altura de escala del plasma para las órbitas 9316 y 3151.

Número órbita Mars Express	9316	3151
Altura de escala del plasma, H_p (km)	1ª H_p : 50-80	1ª H_p : 30 2ª H_p : 40-45

A la vista de los resultados es evidente el efecto directo del campo magnético inducido en la ionosfera marciana en forma de la localización de una segunda altura de escala del plasma, la cual marca el límite de penetración de dicho campo magnético.

A partir de las alturas de escala del plasma características de cada órbita, se pueden establecer los valores de (h_{last}) y (h_{first}) y en consecuencia la altura de transición, AT. Para el régimen de mayor compresión (régimen 3) la altura de transición se encuentra en el rango comprendido entre los (147-166) km, lo cual resulta del todo compatible con los resultados publicados por Shinagawa and Cravens, 1989. En las tablas de los Anexos VII, VIII se muestran los valores estimados para la altura de transición para cada una de las órbitas

respectivamente, así como otros parámetros relevantes para el estudio. A la vista de los valores obtenidos para altura de transición, se puede apreciar cómo estos reflejan la compresión de la ionosfera por el campo magnético inducido en la órbita 3151.

Como se mencionó anteriormente, tanto la altura de transición como la altura de escala del plasma son dos indicadores muy buenos de la compresión del plasma. Para entrar en más detalle en el estudio, se ha analizado el balance de presiones a la altura de transición estimada, con la finalidad de obtener mayor información sobre la interacción entre la ionosfera y el viento solar (Zhang and Luhmann, 1992). Con este análisis se pretende obtener pruebas adicionales del efecto del campo magnético inducido sobre la altura de transición en la órbita 3151. Los valores de campo magnético a la altura de transición, se han calculado según la ecuación (5.5). En la **Figura 5-11**, se muestran los valores del campo magnético obtenidos a partir de las medidas de MARSIS (círculos rosas) a la altura de la nave y los obtenidos a partir del balance de presiones (círculos negros) a la altura de transición.

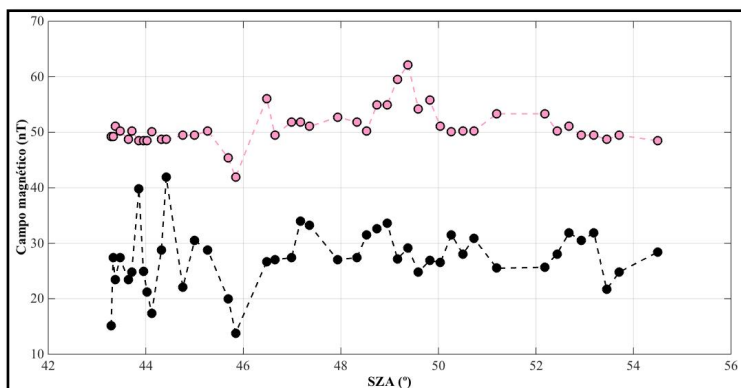


Figura 5-11. Comparación de los valores de campo magnético para la órbita 3151. En rosa, los valores obtenidos a partir de los datos de MARSIS, mientras que en negro se muestran los valores obtenidos a partir del balance de presiones.

A la vista de los resultados, a la altura de transición los valores del campo magnético tienen un valor en torno a los ~ 27 nT, mientras que el valor promedio medido por MARSIS es de aproximadamente 51 nT. Sin embargo, para tener una visión de la capacidad de penetración del campo magnético

inducido se han representado los valores del campo a la altura de escala en función del ángulo cenital solar (Figura 5-12).

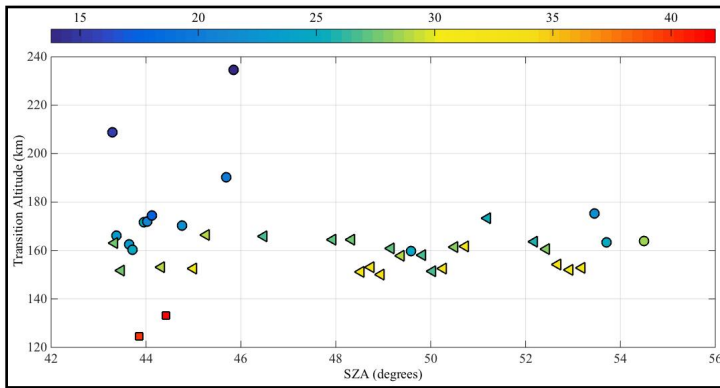


Figura 5-12. Distribución de los valores de campo magnético a la altura de transición, obtenidos a partir del balance de presiones para la órbita 3151, en función del ángulo cenital solar. Círculos (15-25 nT), triángulos (25-35 nT) y cuadrados (>35 nT).

Como resulta lógico, los valores más altos de campo magnético tienen un mayor poder de penetración por lo que los valores de la altura de transición son menores. El balance entre las presiones magnética y térmica da por ello una estimación muy buena del campo magnético inducido en la atmósfera.

Los resultados se han comparado con un modelo ionosférico marciano (Witasse, 2000; Witasse, 2002; Witasse et al., 2003; Morel et al., 2004). Es un modelo en una dimensión y se basa en el acoplamiento de código cinético y fluido. La parte cinética se basa en la aproximación estacionaria de Boltzmann, la cual describe el flujo energético de electrones. Se considera como fuente de electrones tanto los electrones del viento solar incidente como los fotoelectrones. En cuanto a la parte de fluido es un modelo de ocho momentos dependiente del tiempo el cual resuelve las ecuaciones de transporte para cada una de las diferentes especies cargadas así como el flujo de calor. Dicho modelo ha sido probado y testeado ampliamente y su buen funcionamiento ha sido empleado fundamentalmente para la Tierra (Lummerzheim and Lilensten, 1994; Diloy et al., 1996; Brelly et al., 2005). Sobre este modelo se han realizado las modificaciones necesarias, fundamentalmente físicas, con el objetivo de tener en cuenta la interacción entre el campo magnético interplanetario (IMF) y la alta

atmósfera. El modelo computa, en función de la altitud, varios parámetros ionosféricos: densidad electrónica, seis densidades iónicas, velocidades del plasma, temperaturas y campo magnético inducido. En el modelo se han considerado unas condiciones para la atmósfera neutra tomadas de la Viking o Mariner dependiendo de la actividad solar. Sin embargo, se han tenido que realizar una serie de adaptaciones en los perfiles de concentración para ajustar los perfiles ionosféricos, con un campo magnético impuesto en lo alto de la ionosfera (para el caso de la ionosfera magnetizada). Dicho valor se ha elegido de forma arbitraria, típicamente en un rango entre (20-100) nT, el cual se ha adecuado consistentemente con la atmósfera para conseguir el mejor ajuste del perfil ionosférico.

Para esta comparación, se ha seleccionado un perfil (del ionograma 169) y se han representado los resultados en la **Figura 5-13**.

En la figura se han representado tres parámetros: densidad electrónica (panel superior), temperatura del plasma (panel intermedio) y el campo magnético inducido (panel inferior). Para poder ejecutar el modelo, se seleccionan diferentes condiciones geofísicas como parámetros de entrada: actividad solar, ángulo cenital solar y distancia heliocéntrica, para la órbita 3151. Por otra parte se ha establecido un valor de campo magnético para la zona alta de la atmósfera de 57 nT (a 500 km), el cual coincide exactamente con el valor medido a 313 km de altitud.

A partir de los tres paneles de la **Figura 5-13** se han obtenido los siguientes resultados:

∞ Perfil densidad electrónica

La comparación entre el perfil obtenido a partir de los datos del radar MARSIS (estrellas) y los obtenidos a partir del modelo (línea discontinua) muestran un perfecto ajuste incluso en escala lineal. En primer lugar cabe destacar el buen comportamiento del modelo para reproducir tanto la forma como los perfiles y los valores de densidad electrónica de la ionosfera marciana, incluso en presencia de un campo magnético inducido.

∞ Perfil de temperaturas del plasma

Los valores de temperatura del plasma (electrones más iones) se pueden obtener a partir tanto del modelo como de los datos. En el caso de los datos este valor se obtiene a partir de la ecuación utilizada para definir la altura de escala (5.2) y las hipótesis acerca de la composición de los iones descrita anteriormente. Dichos valores (flecha con una cierta longitud, la cual da el rango según el cual se ha calculado la altura de escala) se han comparado con los obtenidos a partir del modelo (línea continua). A la vista de los resultados, se puede comprobar cómo existe una buena concordancia entre los valores estimados y el modelo (550 K a 137 km). Así mismo resultan consistentes con los descritos en la Figura 2 por Shinagawa and Cravens. (1989) donde un valor mayor de 1400 K se alcanza a 160 km para los electrones.

∞ Perfil intensidad campo magnético inducido

Los valores de campo magnético inducido obtenidos a partir del modelo (línea sólida) se han comparado con dos valores de campo magnético dados por MARSIS: uno de ellos medido a la altura de la nave (círculo blanco a los 313 km) y el otro obtenido a partir del balance de presiones (círculo blanco a los 149 km). A dichas altitudes los valores de campo magnético son ~ 55 nT y ~ 34 nT respectivamente, mostrando la buena concordancia con el modelo y con los valores presentados en estudios previos (Shinagawa and Cravens, 1989).

Todos estos resultados llevan a confirmar la hipótesis inicial formulada al inicio del trabajo de esta Tesis en la cual sugeríamos la posibilidad de que un campo magnético horizontal inducido es capaz de penetrar hasta una altitud de 150 km, obteniendo una clara influencia en la distribución de la densidad en los perfiles verticales ionosféricos.

Por último, pasamos a resumir los principales resultados (Ramírez-Nicolás et al., 2015b) obtenidos de la estimación de temperaturas obtenidas a partir de la ecuación (5.6).

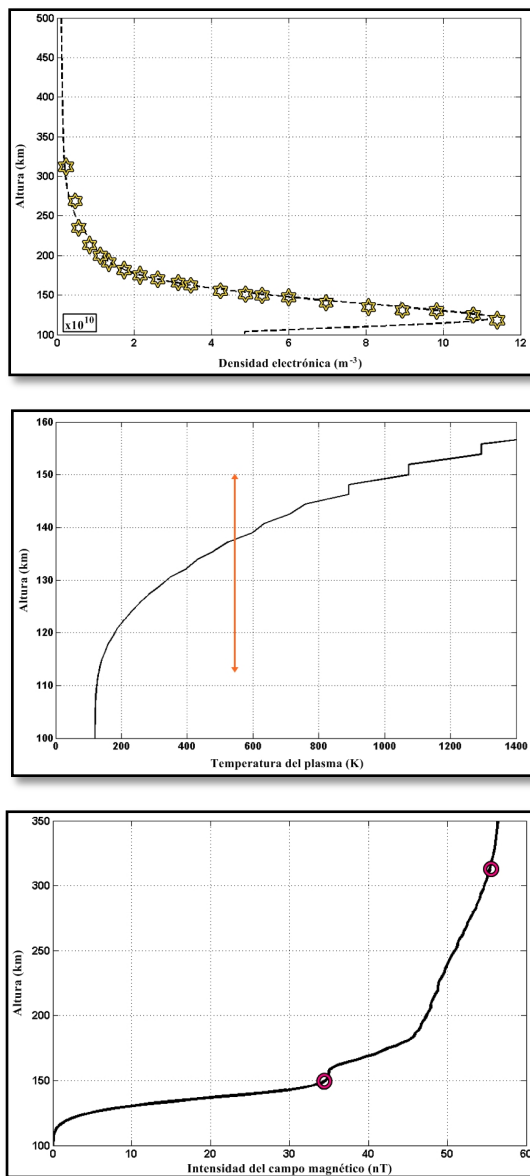


Figura 5-13. Comparación con un modelo numérico de ionosfera marciana. Los tres paneles corresponden a los datos del perfil número 169 de la órbita 3151. El panel superior corresponde al perfil de densidad electrónica, donde las estrellas son los datos proporcionados por MARSIS y la línea el modelo. En el segundo panel se han representado los valores de la temperatura del plasma del modelo, línea negra. La flecha vertical naranja indica el rango sobre el que se ha calculado la altura de escala. El último panel muestra un perfil de intensidad de campo magnético, calculado con el modelo, y los valores del mismo a la altura de transición en círculos rosas.

5.4.2. Caso especial órbita 6788

Con el objetivo de dar un paso más en la investigación de la influencia de un campo magnético inducido sobre la ionosfera marciana, se ha realizado un estudio preliminar para la órbita 6788.

La órbita 6788 descrita por la sonda Mars Express se encuentra ubicada en el hemisferio sur del planeta (Tabla 5-2), en la zona caracterizada por la presencia de anomalías magnéticas de cierta intensidad en la superficie. Al igual que para las órbitas estudiadas anteriormente, en la Figura 5-14, se describen las principales características de la misma

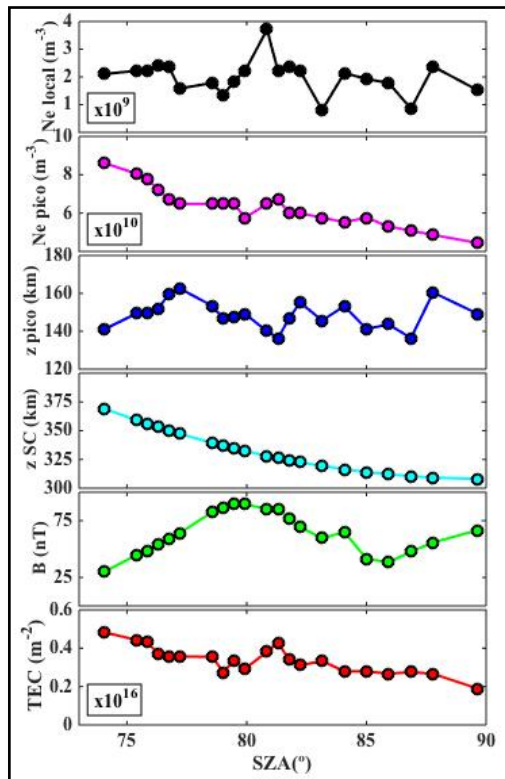


Figura 5-14. Series respecto al ángulo cenital solar de las principales características de la órbita 6788. De arriba a abajo los paneles corresponden a: densidad electrónica a la altura de la nave y en el pico, altura del máximo de densidad electrónica y de la nave, valor del campo magnético obtenido por MARSIS y valor del contenido total de electrones.

El rango de valores del SZA para la órbita 6788 es muy similar al de la órbita 9316, sin embargo como hemos comentado se encuentran en regiones muy diferentes del planeta. A la vista de la **Figura 5-14**, comprobamos como para dicha órbita los valores de la densidad electrónica local permanecen muy constantes a lo largo de la misma con valores próximos a $2 \cdot 10^9 \text{ e/m}^3$, aunque encontramos valores en un rango comprendido entre $(1.5-4) \cdot 10^9 \text{ e/m}^3$, lo cual muestra un comportamiento de este parámetro mucho más estable que en los casos anteriores. En cuanto a las características del pico se constata cómo los valores de densidad electrónica en el máximo se encuentran entre $(4.5-9) \cdot 10^{10} \text{ e/m}^3$ mientras que los valores de la altura en el mismo oscilan entre (135-165) nT. Comparando dichos valores con los característicos de las órbitas 9316 y 3151 se comprueba cómo los valores para la densidad son considerablemente inferiores sin embargo, los valores de la altura del pico, aunque ligeramente superiores, son similares a los de la órbita sin campo 9316. Por otra parte, disponemos de los valores de campo magnético medidos por MARSIS, con valores entre los (25-100) nT, los cuales corresponden a las medidas de la suma del campo magnético del viento solar y el campo magnético de la superficie. Por último, en relación a los valores de TEC, se observa cómo a lo largo de la órbita van oscilando entre $(0.2-0.5) \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$.

A partir de toda esta información se puede deducir, en primera aproximación, cómo, a pesar de que se aprecia una compresión en la ionosfera por la presencia de un campo magnético inducido, el campo magnético en la superficie hace que dicha compresión sea menor. Un efecto de este balance de campos magnéticos lo podemos apreciar en los valores más o menos constantes de la densidad electrónica en el pico.

Un primer análisis de los perfiles de la órbita (Anexo VI) nos lleva a apreciar una clara compresión en todos ellos. Por este motivo procediendo de igual manera que en el caso anterior se ha calculado la altura de escala del plasma (**Figura 5-15**) tanto para la parte regida por procesos fotoquímicos como para la que no, obteniendo de nuevo dos alturas de escala (como en la órbita 3151).

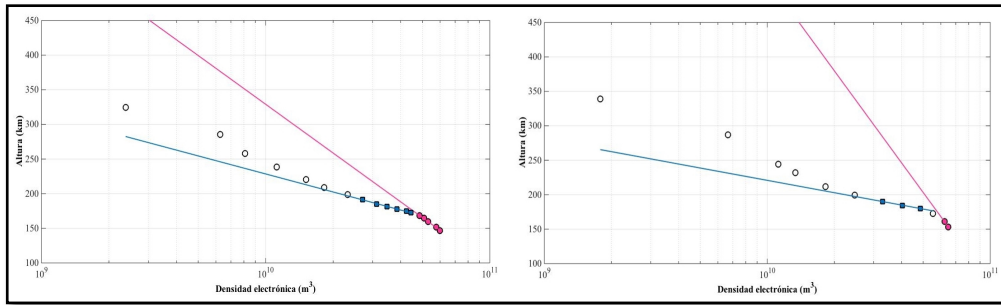


Figura 5-15. Comparativa de los dos perfiles característicos de la órbitas 6788. A la izquierda, el perfil de densidad electrónica número 177 y a la derecha, el perfil de densidad electrónica número 184. Las alturas de escala identificadas: en rosa la correspondiente a la región fotoquímica y en azul el resultado del efecto del campo magnético sobre la ionosfera.

La Figura 5-15 muestra los dos tipos de perfiles que se obtienen a lo largo de toda la órbita. En la figura de la izquierda corresponde con perfiles en los que se podría concluir que las identificaciones de ambas alturas de escala (Anexo IX) quedan bien definidas (en rosa la correspondiente a la región fotoquímica y en azul el resultado del efecto del campo magnético sobre la ionosfera), mientras que en la derecha, aunque también se han podido obtener ambos valores, los resultados han de tomarse con precaución, ya que el número de puntos para el ajuste en la región fotoquímica es muy pequeño. A pesar de ello, por los resultados mostrados en la Subsección 5.4.1, y siguiendo la metodología descrita anteriormente, se puede apreciar en esta órbita una clara compresión a lo largo de la misma.

Aunque no se pueda realizar una comparación directa entre los valores obtenidos de las tres órbitas (Tabla 5-4), sí se puede apreciar cómo en el caso de la órbita 6788 los valores para ambas alturas de escala del plasma son mayores en comparación con las otras dos órbitas. Posiblemente el hecho de la presencia de un campo magnético cortical que eleve la altura de la ionosfera y en consecuencia la altura en la cual se aprecia la compresión de la misma, podría ser la explicación más plausible del efecto observado.

Tabla 5-4. Valores característicos correspondientes a la altura de escala del plasma para las órbitas 9316, 3151 (en el mismo rango de latitudes) y 6788 (para toda la órbita).

Número órbita Mars Express	9316	3151	6788
Altura de escala del plasma, H_p (km)	1ª H_p : 50-80	1ª H_p : 30 2ª H_p : 40-45	1ª H_p : 45-100 2ª H_p : 40-55

A partir de los valores de la altura de escala del plasma en la parte fotoquímica, se han podido estimar los valores de la altura de transición ~ 175 km (Anexo IX). Con estos valores y aplicando el balance de presiones se han estimado (de forma preliminar) los valores del campo magnético a dicha altura (Figura 5-16).

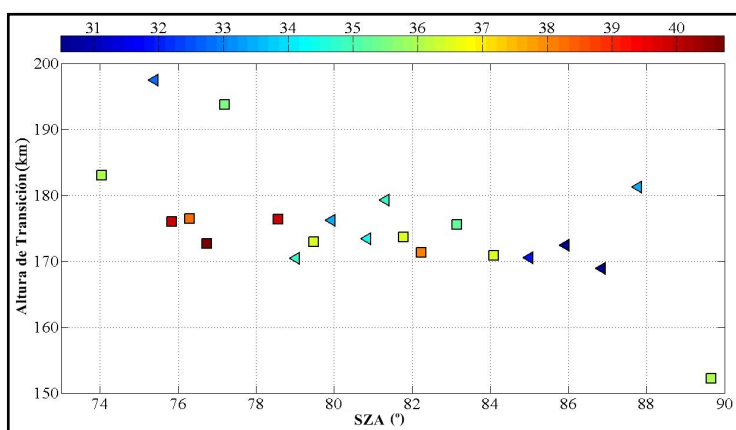


Figura 5-16. Distribución del campo magnético a la altura de transición, obtenido a partir del balance de presiones, para la órbita 6788 en función del ángulo cenital solar. La escala de colores del azul al rojo indica la intensidad del campo magnético de forma creciente en nT. Círculos (15-25) nT, triángulos (25-35) nT y cuadrados (>35) nT.

Teniendo en cuenta las observaciones anteriores y a la vista de los resultados mostrados en la Figura 5-16, se observa como los valores del campo magnético estimados a partir del balance de presiones a la altura de transición oscilan en un rango de valores comprendido entre los (30-40) nT. A continuación se han comparado todos los valores del campo magnético calculados, Figura 5-17. Para ello se han representado los valores de campo magnético calculado con MARSIS (amarillo), el estimado a partir del balance de presiones (negro) y el módulo del campo magnético estimado a partir del modelo propuesto por Cain et al. (2003) descrito en la Subsección 5.3.3, (naranja), en función del ángulo cenital solar.

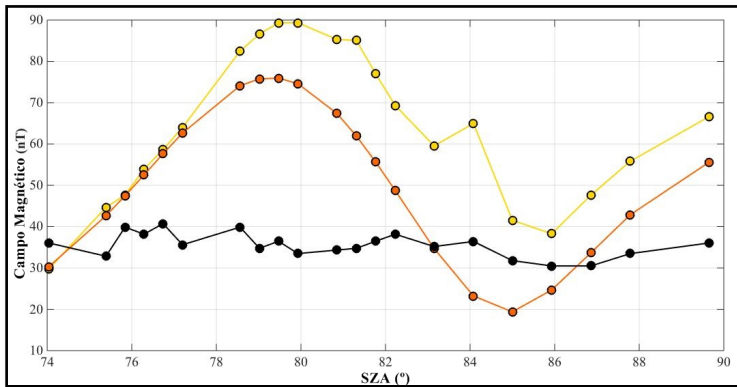


Figura 5-17. Comparativa de los valores del campo magnético en función del ángulo cenital solar. En amarillo el campo magnético deducido a partir de MARSIS, en naranja los valores obtenidos a partir del modelo de Cain et al. (2003) y en negro los deducidos a partir del balance de presiones.

A la vista de la (Figura 5-17) se obtiene que los valores del campo magnético son respectivamente:

- ∞ (30-90) nT, a partir de las medidas de MARSIS
- ∞ (30-40) nT, a partir del balance de presiones
- ∞ (30-80) nT, a partir del modelo de Cain et al. (2003)

Gráficamente puede apreciarse cómo los valores de campo magnético medidos a partir de MARSIS tienen una clara influencia del campo magnético cortical, ya que describen un comportamiento muy similar. Sin embargo, a pesar de que los valores son bastante similares no son exactamente iguales ya que como se ha mencionado anteriormente, además del campo magnético cortical en la medida de MARSIS también aparece sumada la contribución del campo magnético del viento solar. A pesar de que se han hecho trabajos adicionales para poder cuantificar las contribuciones al campo magnético obtenido a partir de los datos de MARSIS no se han podido establecer resultados definitivos dada la falta de datos in situ. Con la llegada de las nuevas misiones se espera que a partir de los datos que se registren se puedan esclarecer las dudas que todavía permanecen acerca del efecto del viento solar sobre la ionosfera marciana.

Por último se ha procedido a estimar (para tomar los valores como referencia para estudios futuros) los valores de temperatura del plasma a la altura de transición a partir del balance de presiones. Hay que destacar que los resultados que se han obtenido son muy similares a lo largo de toda la órbita, tanto en forma como en magnitud. Dichos resultados, al igual que en el caso anterior, muestran una buena concordancia con los resultados presentados en estudios previos (Shinagawa and Cravens, 1989), a pesar de que los valores tan sólo coinciden en el orden de magnitud.

Hay que tener en cuenta que todos estos resultados sirven como una primera aproximación, ya que como se ha mencionado al principio de esta subsección esta órbita está bajo la influencia del campo magnético inducido y del campo magnético procedente de la superficie.

5.5. Discusión II

A lo largo de este capítulo, se han analizado en detalle los datos proporcionados por MARSIS y de la comparación con el modelo, confirmando por primera vez el hecho de que el campo magnético inducido puede penetrar en profundidad en la ionosfera marciana, comprimiendo fuertemente el plasma. Este hecho se ha podido confirmar a partir de los diferentes resultados y evidencias encontradas en este trabajo.

Tras la comparación de los diferentes parámetros característicos para las órbitas 3151 (con campo) y 9316 (sin campo), como el contenido total de electrones, densidad y altura del pico se ha apreciado una clara compresión en la órbita 3151 en comparación con la órbita 9316. Dicha compresión se observa de forma evidente en los perfiles verticales de densidad electrónica de 14 ionogramas adquiridos por el radar MARSIS para la órbita 3151. Por lo general esta compresión viene identificada por una disminución en los valores de la altura de escala del plasma así como por un cambio de tendencia en dicho valor (pudiendo identificar dos valores de altura de escala del plasma para cada uno de los perfiles analizados).

Todo ello queda confirmado y avalado por los resultados proporcionados por la densidad electrónica normalizada, donde dicha compresión resulta visible entre las alturas normalizadas 1 y 3.

Por otra parte, se ha podido establecer una altura de transición para la órbita 3151 de ~ 150 km debido a la penetración del campo magnético inducido.

Por último se ha analizado el balance de presiones entre la ionosfera y el viento solar, alcanzando unos valores para la temperatura del plasma muy razonables y en perfecto acuerdo con los valores obtenidos en trabajo previos (Shinagawa and Cravens, 1989). Además, se ha estimado el valor del campo magnético inducido a la altura de transición, el cual concuerda perfectamente con los valores obtenidos a partir de valores teóricos.

En lo que se refiere a la órbita 9316, se ha podido constatar que se trata de una órbita con un comportamiento muy estable, en la que los valores de la altura de escala se mantienen prácticamente constantes a lo largo de todos los perfiles de la órbita. Por este motivo se ha utilizado esta órbita como criterio de comparación para la órbita 3151.

Finalmente, se ha realizado un estudio análogo para la órbita 6788, la cual muestra también una compresión en la ionosfera por el campo magnético inducido, sin embargo no es posible tomar como absolutos estos resultados ya que en esta órbita dada la presencia de un campo magnético en la superficie del planeta. A pesar de ello se han podido identificar una clara compresión del plasma a lo largo de toda la órbita.

CAPÍTULO

6

RESULTADOS III.
ANÁLISIS DEL CAMPO ELÉCTRICO

El Capítulo 6 de esta Tesis Doctoral muestra los resultados obtenidos a partir del estudio realizado del campo eléctrico en Marte. En él se describen los resultados relacionados con la evolución temporal del campo eléctrico en función de los parámetros característicos del modelo y se presentan los resultados obtenidos al resolver la ecuación (3.5), empleando el método de Runge-Kutta y el esquema numérico presentado en esta Tesis.

6.1. Descripción general

Desde 1969 (Stow, 1969) se ha podido confirmar la relevancia del estudio del comportamiento del polvo ya que afecta de forma directa a la dinámica atmosférica del planeta así como a diferentes procesos y propiedades de la misma. Además de las importantes consecuencias que tiene sobre la temperatura o la durabilidad y fiabilidad de los instrumentos a bordo de los rovers, descritas en el Capítulo 3, se han encontrado importantes vínculos entre el polvo y los campos eléctricos.

Con los datos de los que se dispone, los estudios se han centrado principalmente en el análisis de la composición del polvo, a partir de las medidas registradas por las distintas misiones (Hunt et al., 1973; Bell et al., 2000; Ruff, 2011), así como en su dinámica a lo largo del planeta en forma de tormenta, *dust devil*... (Clancy et al., 2012; Kok et al., 2012; Odaka et al., 2005).

Gracias a la llegada de las nuevas misiones a Marte, como la Mars Science Laboratory (MSL), o la misión MAVEN, se han puesto de manifiesto muchos de los efectos del polvo y en particular el motivo por el cual adquiere una gran relevancia en los instrumentos, (Figura 6-1, Figura 6-2). Dicho polvo se encuentra distribuido a lo largo de toda la superficie del planeta y a partir de diferentes medios de transporte éste es capaz de recorrer grandes distancias. Además del movimiento del polvo, hay que destacar que interviene en numerosos procesos dinámicos como la formación de dunas, los *dust devils* o las tormentas de polvo a escala local o global. Sin embargo se ha detectado un efecto de gran relevancia que consiste en el hecho de que dicho polvo se deposita sobre los rovers y la instrumentación de las diferentes misiones a Marte ocasionando en ocasiones el mal funcionamiento de los mismos.

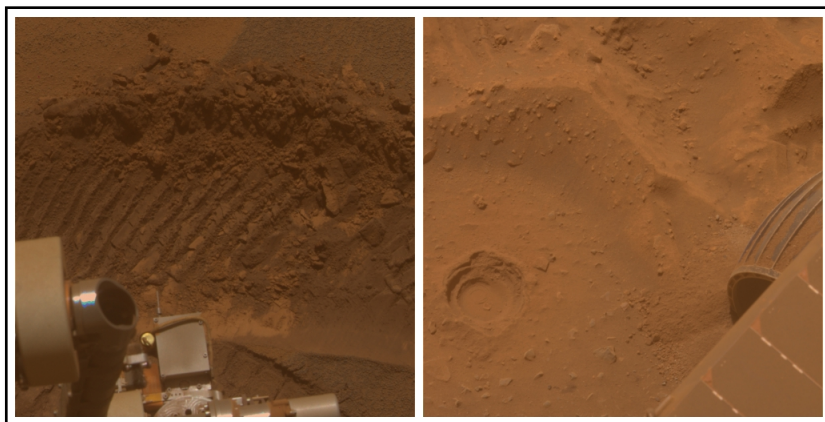


Figura 6-1. Dos imágenes reales obtenidas por la cámara de alta resolución, PanCam (Panoramic Camera System), a bordo de la misión Spirit, (www.pancam.astro.cornell.edu).

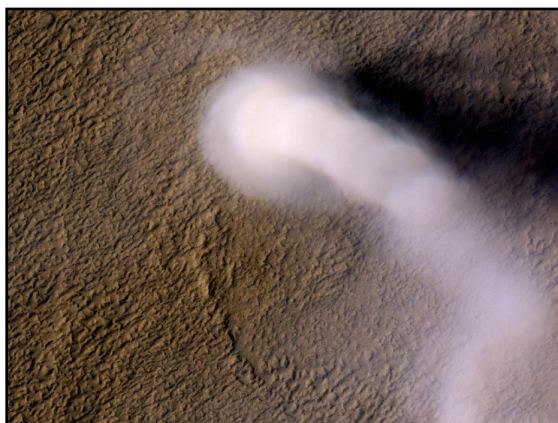


Figura 6-2. Imagen de un *dust devil* captado el 14 de marzo de 2012 por la Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). NASA/JPL-Caltech/UA.

Ambas figuras (Figura 6-1, Figura 6-2) pertenecen a imágenes reales tomadas por las misiones Spirit y Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). En la primera (a la izquierda) se observa, parte del rover MSL sobre el que, la acción del polvo cubriendo los instrumentos se hace visible. La segunda figura corresponde a una imagen tomada por la misión MRO el 14 de marzo de 2012. En ella aparece un *dust devil* de 20 km de altura, que fue localizado a lo largo de la región Amazonis Planitia en el norte del planeta.

6.2. Campo eléctrico

6.2.1. Runge-Kutta

Siguiendo lo descrito en el Capítulo 3, el método de Runge-Kutta fue el seleccionado por autores como Farrell et al. (2003, 2006) para aproximar numéricamente la solución de la evolución temporal del campo eléctrico en el interior de un *dust devil* (3.1).

Para realizar el primer análisis nos hemos centrado en el campo eléctrico obtenido a partir de las interacciones entre granos de polvo que se encuentran en movimiento en el interior de un *dust devil* en Marte. Se han seleccionado dos poblaciones de granos de polvo: grandes (L) y pequeños (S), asumiendo que las diferencias entre las velocidades de las partículas grandes y pequeñas no se mantienen constante a lo largo del tiempo, sino que varía con el tiempo, $\Delta v(t)$.

Las expresiones de las velocidades vienen dadas por las expresiones descritas en el Capítulo 3, (3.11, 3.12), donde se han seleccionado los siguientes parámetros para su resolución (Tabla 6-1).

Tabla 6-1. Valores utilizados para las partículas grandes y pequeñas correspondientes así como las condiciones atmosféricas marcianas.

Parámetros	Valor
g (m/s ²)	3.71
ρ_p (kg/m ³)	$2.65 \cdot 10^3$
ρ_a (kg/m ³)	$1.60 \cdot 10^{-2}$
σ (S/m)	$2.50 \cdot 10^{-12}$
ϵ_0 (F/m)	$8.85 \cdot 10^{-12}$
e (C)	$1.60 \cdot 10^{-19}$
W (m/s)	7
r_L (μm)	20
n_L (m ⁻³)	$1 \cdot 10^6$
r_S (μm)	1
n_S (m ⁻³)	$50 \cdot 10^6$

A partir de dichos valores se ha representado la evolución con el tiempo de los valores de las velocidades (Figura 6-3) para los granos grandes (línea roja) y pequeños (línea azul), así como las diferencias entre ambas (línea negra).

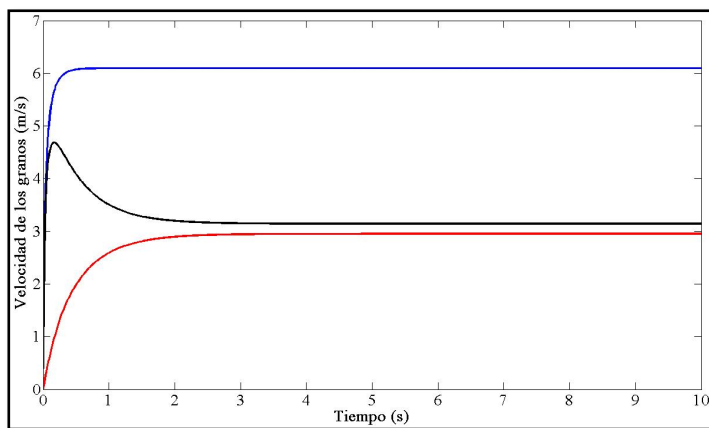


Figura 6-3. Evolución de las velocidades de los granos grandes (línea roja), granos pequeños (línea azul) y la diferencia entre las velocidades (línea negra).

A la vista de los resultados de la Figura 6-3 hay que resaltar el hecho de que ambas partículas adquieren un comportamiento constante con el paso del tiempo. Sin embargo, las partículas más pequeñas necesitan mucho menos tiempo para alcanzar dicho estado. De este modo se puede considerar que para tiempo pequeños, los primeros instantes de la acción del viento sobre las partículas, ambas partículas parecen responder a un comportamiento exponencial (inverso), aunque con diferentes tiempos de reacción. En cambio, para tiempos mayores el comportamiento es completamente equivalente, aunque con valores muy distintos, siendo las velocidades de las partículas más pequeñas mayores que la de las grandes. De este modo se pueden separar dos regímenes de comportamiento en las velocidades de las partículas en el interior de un *dust devil*, uno en el que las diferencias entre las velocidades varían con el tiempo, y otro en el que esta diferencia permanece constante.

Sin embargo, al considerar que las diferencias entre las velocidades son variables con el tiempo, la evolución temporal del campo eléctrico pasa a escribirse como:

$$\frac{d^2 E}{dt^2} + \frac{dE}{\varepsilon_0} = -\frac{n_L}{\varepsilon_0} \left(\frac{dQ_L}{dt} \Delta v + \frac{d(\Delta v)}{dt} Q_L \right) \quad 6.1$$

donde $\frac{dQ_L}{dt} \Delta v$ corresponde a la variación temporal de la carga de las partículas grandes para diferencias entre velocidades Δv constantes, mientras que $\frac{d(\Delta v)}{dt} Q_L$ está asociado con el comportamiento de los granos cargados bajo diferencias de aceleraciones. A partir del método de Runge-Kutta (Anexo II) se ha calculado el valor del campo eléctrico a lo largo del tiempo (Figura 6-4).

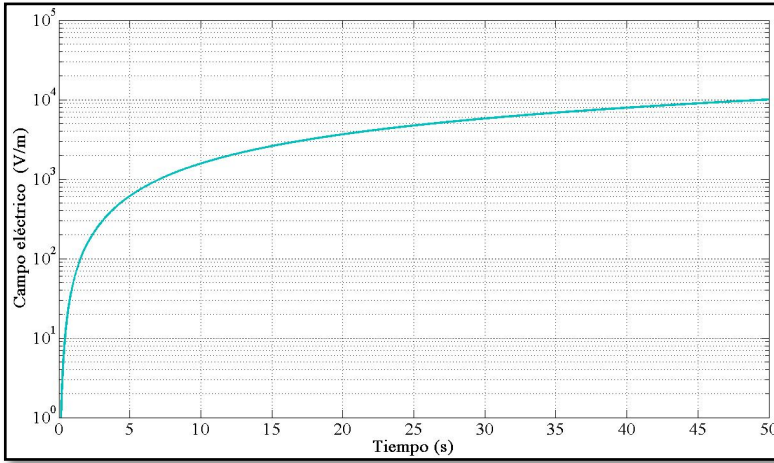


Figura 6-4. Evolución temporal del campo eléctrico obtenido al utilizar el método de Runge-Kutta en la ecuación (6.1), considerando únicamente las fuerzas asociadas a las variaciones temporales en la carga para diferencias de velocidades entre los granos pequeños y grandes constantes.

Los resultados de la Figura 6-4, muestra la evolución del campo eléctrico calculado a partir de la ecuación (6.1) teniendo en cuenta únicamente el termino de las variaciones de carga con el tiempo. Bajo las condiciones descritas, se obtiene un valor para el potencial eléctrico de ruptura de 10 kV/m, resultado que se ajusta perfectamente a los mostrados por otros autores como Farrel et al. (2006) ó Zhai et al. (2006). Así mismo, se observa un comportamiento

exponencial del valor del campo eléctrico. Dicho valor aumenta rápidamente en los primeros instantes, alcanzando un estado cuasi-constante (sigue aumentando el valor, pero muy lentamente) para tiempos > 50 s. Estos resultados se han obtenido asumiendo que la diferencia de potenciales triboeléctricos superficiales de las partículas que entran en contacto, $\Delta\phi$, tiene un valor de 2 V, según lo descrito por Desch and Cuzzi. (2000).

6.2.2. Esquema numérico propuesto

En el Capítulo 4, se presentó un esquema numérico capaz de describir el comportamiento y las trayectorias de las partículas cargadas eléctricamente en su interacción con diferentes campos magnéticos. En esta Sección, se presentará un esquema numérico basado en él, capaz de proporcionar los valores de campo eléctrico obtenidos a partir de las propiedades de las poblaciones de granos de polvo que interaccionen.

El esquema numérico propuesto está definido por la discretización de la ecuación (6.1), la cual pasa a escribirse como:

$$\frac{E^{n+2} - 2E^{n+1} + E^n}{h^2} + \frac{\sigma}{\epsilon_0} \frac{E^{n+2} - E^n}{2h} = F(t)^{n+1} \quad 6.2$$

La ecuación (6.2), describe la evolución temporal del campo eléctrico en función del término $F(t)^{n+1}$ que incluye las relaciones existentes entre las cargas y las diferencias en las velocidades de las partículas. En relación a este término se han propuesto tres configuraciones diferentes en función de las fuerzas que actúen sobre las partículas en cada estudio. De este modo se puede analizar en detalle las respuestas de las partículas en los primeros instantes de su evolución en el interior de un *dust devil*.

CASO 1. En el primer caso se considera que sólo entra en juego únicamente el término relacionado con las variaciones de carga de las partículas grandes y con diferencias entre las velocidades de los granos constantes

$$F(t) = -\frac{n_L}{\varepsilon_0} \frac{dQ_L}{dt} \Delta v \quad 6.3$$

Para este caso, al sustituir la ecuación (6.3) en la ecuación (6.2) y después de realizar las correspondientes simplificaciones, se obtiene una expresión del campo eléctrico discretizado de la forma

$$E^{n+2} = \frac{I}{2\varepsilon_0 + \sigma h} \left(2\varepsilon_0 h^2 F^{n+1}(t) + 4\varepsilon_0 E^{n+1} - 2\varepsilon_0 E^n + \sigma h E^n \right) \quad 6.4$$

donde el valor de las fuerzas que intervienen tiene la siguiente expresión

$$F(t) = -Y \cdot (\Delta v)^2 \quad 6.5$$

siendo $Y = \frac{n_L}{\varepsilon_0} \pi \cdot r_L^2 \cdot n_S \cdot \Delta q$.

CASO 2. En el segundo caso se ha considerado que entran en juego las fuerzas asociadas a las aceleraciones de las partículas, considerando valores para la carga de las partículas grandes constantes a lo largo del tiempo (Melnik and Parrot, 1989).

$$F(t) = -\frac{n_L}{\varepsilon_0} \frac{d(\Delta v)}{dt} Q_L \quad 6.6$$

En este ocasión, el término (6.6) de la ecuación del campo eléctrico (6.4), viene definido por:

$$F(t) = -Q_L \frac{n_L}{\varepsilon_0} \left(\frac{dv_L}{dt} - \frac{dv_S}{dt} \right) \quad 6.7$$

CASO 3. En el tercer caso se propone la acción de ambas fuerzas, por lo que la expresión del término (6.6) viene dado por:

$$F(t) = -Y(\Delta v)^2 - Y(A - B) \left(\frac{dv_L}{dt} - \frac{dv_S}{dt} \right) \quad 6.8$$

donde $A = \int v_L dt$ y $B = \int v_S dt$. Las expresiones extendidas de estos dos términos se muestran a continuación

$$A = \frac{2(W^2 c_L - g) \left(t(2Wc_L + w_L) - 2 \log(2Wc_L (\exp(w_L t) - 1) + w_L (\exp(w_L t) + 1)) \right)}{4W^2 c_L^2 - w_L^2} \quad 6.9$$

$$B = \frac{2(W^2 c_S - g) \left(t(2Wc_S + w_S) - 2 \log(2Wc_S (\exp(w_S t) - 1) + w_S (\exp(w_S t) + 1)) \right)}{4W^2 c_S^2 - w_S^2} \quad 6.10$$

Los esquemas propuestos, además de ser una nueva forma de obtener los valores del campo eléctrico a partir de los procesos triboeléctricos de carga entre las diferentes poblaciones de granos, resultan un modo muy estable y preciso de calcular dichas soluciones. Una de las ventajas más importantes de dicho esquema es su buen comportamiento a tiempos largos, lo cual puede ser muy interesante para realizar modelizaciones de las trayectorias completas de un *dust devil*. Sin embargo, como hemos comprobado en esta primera aproximación al problema, las grandes diferencias entre los diferentes estados de las partículas suceden en los primeros instantes del fenómeno.

6.3. Presentación de los resultados

A partir de las ecuaciones mostradas en las Subsecciones 6.2.1 y 6.2.2, a continuación, se procederá a mostrar los principales resultados del estudio realizado así como las principales conclusiones del mismo.

6.3.1. Validación del esquema numérico

En la sección anterior se han descrito a partir del esquema numérico propuesto en esta Tesis las ecuaciones necesarias para calcular la evolución temporal del campo eléctrico. A partir de estas ecuaciones, el primer paso es la validación de dicho esquema numérico para el problema de estudio. Para ello se han comparado las soluciones obtenidas a partir del método Runge-Kutta (6.1; Anexo II) y las obtenidas a partir del esquema numérico (6.4), ya que corresponde con el caso más elemental de estudio (Figura 6-5). Para este caso se ha realizado una comparativa entre dos poblaciones de granos en movimiento en el interior de un *dust devil* bajo las condiciones características de Marte, según lo descrito en la Tabla 6-1 y teniendo en cuenta las tres posibles discretizaciones planteadas en función de los términos utilizados de la ecuación (6.4).

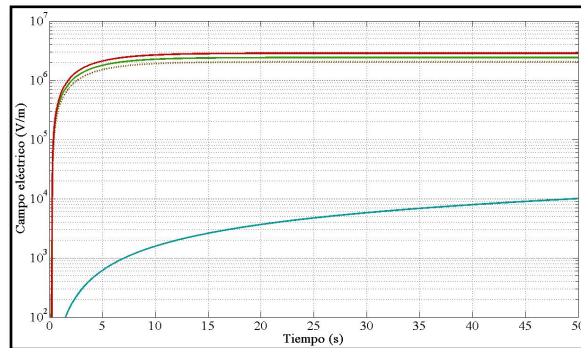


Figura 6-5. Evolución temporal del campo eléctrico en el interior de un *dust devil*. Las líneas discontinuas muestran las soluciones obtenidas a partir del método Runge-Kutta, mientras que las líneas continuas corresponden con las soluciones obtenidas a partir del esquema numérico propuesto. En azul, se muestra la solución del caso 1, en verde la correspondiente al caso 2 y en rojo el caso 3.

La Figura 6-5 muestra la evolución del campo eléctrico en los 50 primeros segundos de un *dust devil*. Las líneas discontinuas son los valores obtenidos a partir del método de Runge-Kutta, mientras que con líneas continuas se muestran los obtenidos a partir del esquema numérico propuesto. En azul, se muestran los valores obtenidos teniendo en cuenta únicamente el término relacionado con las variaciones respecto del tiempo de las cargas de los granos grandes. En este caso se han considerado, como se ha mencionado

anteriormente, que las diferencias entre las velocidades de los granos permanecen constantes, $\Delta v = -1$ m/s, (Volland, 1984; Farrell et al., 2003). La coincidencia entre los resultados, para en este caso, es prácticamente total. En los otros dos casos: se ha tenido en cuenta, por un lado, únicamente el término vinculado a las variaciones temporales de los incrementos de las velocidades para valores de Q_L constantes (línea verde), y por otro la ecuación completa (con los dos términos), asumiendo un valor variable de Q_L con el tiempo (línea roja). En estos dos casos los resultados obtenidos por el esquema numérico reproducen bien los obtenidos por Runge-Kutta a pesar de las pequeñas diferencias que se observan entre ellos. Estas diferencias residen en el buen comportamiento para tiempos largos. Además, el esquema propuesto cumple con las simetrías de variación (tanto desde un punto de vista continuo como discreto), tal y como se describió en el Capítulo 4.

A partir de los resultados mostrados, se confirma el buen comportamiento y estabilidad del esquema así como su utilidad para tiempos largos.

A continuación se ha analizado en detalle los resultados obtenidos a partir de los tres casos discretos planteados. En este sentido, en la Figura 6-6 se muestran los resultados de la ecuación (6.2) teniendo en cuenta las diferentes fuerzas actuantes (6.6, 6.7 y 6.8).

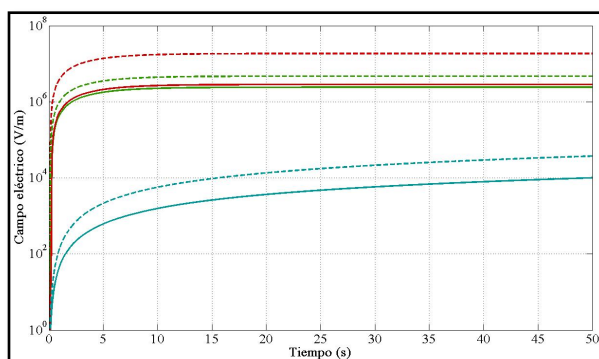


Figura 6-6. Evolución del campo eléctrico obtenido a partir del esquema numérico propuesto para resolver la ecuación (6.1). En líneas discontinuas se muestran las soluciones para $r_L=30$ μm , y las continuas para $r_L=20$ μm . En azul, verde y rojo se identifican las soluciones del caso 1, caso 2 y caso 3 respectivamente.

En la **Figura 6-6** se muestran los resultados obtenidos a partir de cada uno de los métodos. A partir de esta figura no sólo se va a analizar las diferencias en la evolución del campo eléctrico, sino que se analizará en primera aproximación el efecto del tamaño de los granos (se verá en mayor detalle en la Sección 6.3.3). Con líneas continuas se muestran los resultados para una población de granos grandes con un radio de 20 μm , mientras que las líneas discontinuas corresponden a un radio de 30 μm . En azul claro, se muestra la evolución temporal del campo eléctrico en el interior de un *dust devil*, considerando únicamente el término asociado a las variaciones de carga dependientes del tiempo. En color verde se representa la solución obtenida teniendo en cuenta el término relacionado con las aceleraciones de los granos, mientras que en rojo se muestra dicha evolución teniendo en cuenta ambas fuerzas y una carga de los granos grandes variable con el tiempo. En el caso de las diferencias entre los radios de los granos grandes, queda de manifiesto el hecho de que en igualdad de condiciones, un aumento en el tamaño de los granos conlleva un aumento en los potenciales de ruptura. Así mismo se aprecia una clara diferencia en la evolución del campo en los primeros (10-15) s. De este modo se observa cómo el término asociado a las aceleraciones de las partículas (línea roja) tiene una mayor influencia en los valores del campo, provocando que se alcance el valor cuasi-constante de una forma mucho más rápida. Este mismo efecto se alcanza para valores de cargas constante a lo largo del tiempo (línea verde). Sin embargo, esta hipótesis resulta ser la menos realista ya que no puede asumirse que los granos grandes no varíen el valor de su carga mientras se encuentren en movimiento en el interior de un *dust devil*. Por último, en el caso de no tener en cuenta las fuerzas asociadas a la aceleración (línea azul), los valores del campo se alcanzan de una manera mucho más progresiva. Hay que resaltar que para todos los casos, el valor de campo eléctrico final se obtiene en los primeros segundos de la interacción.

6.3.2. Comparación entre el campo eléctrico marciano y terrestre.

Como se ha descrito en las Secciones anteriores (Capítulo 3) los fenómenos relacionados con el campo eléctrico y que están siendo ampliamente estudiados en la Tierra, han sido identificados también en Marte. Todas las ecuaciones

propuestas en este Capítulo, se basan en hipótesis, metodologías y fenomenologías que se aplican en la Tierra. Sin embargo, como se ha mencionado, los órdenes de magnitud, características y propiedades de los fenómenos son muy diferentes. En este sentido se ha realizado una comparativa entre los valores obtenidos para la evolución del campo eléctrico en la Tierra y en Marte. Los valores empleados corresponden a los recogidos en la [Tabla 6-1](#) para Marte, mientras que para la Tierra se han asumido los mismos a excepción de los que se resumen en la [Tabla 6-2](#).

Tabla 6-2. Valores complementarios a la Tabla 6-1 para el caso de la Tierra.

Parámetro	Valor
g (m/s ²)	9.81
ρ_a (kg/m ³)	1.293
σ (S/m)	$7.4 \cdot 10^{-14}$

A partir de los valores resumidos en la [Tabla 6-1](#) y [Tabla 6-2](#) se ha utilizado la ecuación (6.3) para resolver la ecuación (6.2) y obtener una comparación de los potenciales de ruptura, así como de sus valores para el caso de la Tierra y de Marte ([Figura 6-7](#)).

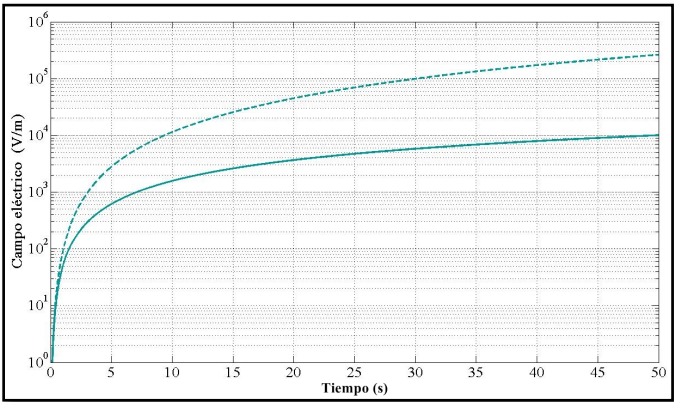


Figura 6-7. Evolución del campo eléctrico obtenido a partir del caso . La línea continua y la discontinua corresponden con los casos de Marte y de la Tierra respectivamente.

A partir de esta figura se observa que bajo las mismas condiciones en cuanto a densidades de granos, tamaño de los mismos, velocidad del viento, etc, la evolución temporal del campo eléctrico sigue presentando un comportamiento exponencial. Sin embargo, los granos, bajo estas condiciones, necesitan menos tiempo en el caso de la Tierra (línea discontinua) para alcanzar un orden de magnitud cuasi-definitivo del campo eléctrico. En detalle, se observa cómo a los primeros 5 s el valor del campo eléctrico en el caso de Marte (línea continua) es de $6.5 \cdot 10^2$ V/m, mientras que en el caso de la Tierra (línea discontinua) este valor asciende hasta los $3.0 \cdot 10^3$ V/m.

Por otra parte, se ha comprobado cómo este modelo, a pesar de ser una primera aproximación, es capaz de reproducir los valores de los potenciales de ruptura con precisión. En este sentido, tal y como se ha mencionado anteriormente, el valor en el caso de Marte es de unos ~ 10 kV/m, mientras que en el caso de la Tierra este valor asciende hasta los ~ 20 MV/m. Dichos valores coinciden con los presentados en estudios previos (Zhai et al., 2006; Farrell et al., 2006).

6.3.3. Influencia de los parámetros

Dado el buen comportamiento del esquema propuesto se ha realizado un estudio detallado de la evolución de los valores del campo eléctrico en función de los parámetros necesarios para resolver la ecuación (6.2). Para el estudio se ha asumido que la carga de los granos grandes varía con el tiempo y que las diferencias entre las velocidades de las partículas permanecen constantes durante la evolución del *dust devil*.

A la hora de resolver el esquema numérico propuesto tan sólo son necesarios los siguientes valores:

- ∞ Parámetros de las dos poblaciones que entren en contacto: tamaño y densidad de partículas de cada especie.
- ∞ Parámetros característicos del entorno del planeta como: gravedad, velocidad del viento, densidad y conductividad atmosférica.

Por este motivo se ha estudiado el efecto que produce cada uno de estos parámetros sobre el comportamiento y los valores del campo eléctrico obtenido.

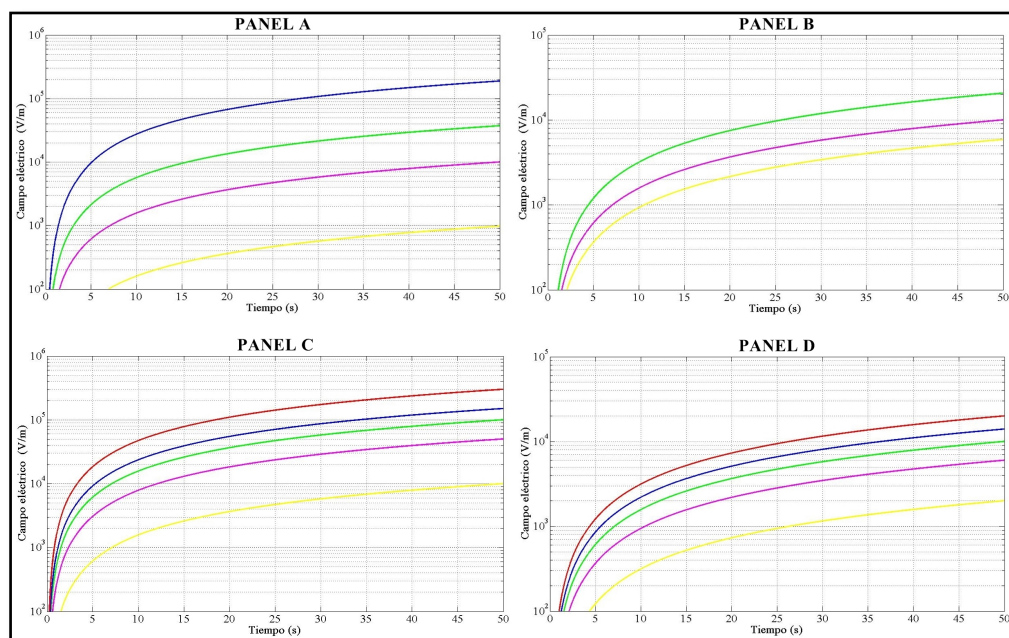


Figura 6-8. Valores de campo eléctrico bajo condiciones iniciales diferentes.

Panel A: r_L (μm)= 10 (amarillo), 20 (rosa), 30 (verde) y 50 (azul);

Panel B: r_s (μm)= 0.5 (amarillo), 1 (rosa), 5 (verde);

Panel C: n_L ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)= 10(amarillo), 5 (rosa), 10 (verde), 15 (azul) y 30 (rojo);

Panel D: n_s ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)= 10(amarillo), 30 (rosa), 50 (verde), 70 (azul) y 100 (rojo).

En la **Figura 6-8** se comparan las evoluciones del campo eléctrico para un mismo intervalo de tiempo (50 s) para diferentes valores de: radio de los granos grandes (r_L), radio de los granos pequeños (r_s), densidad de granos grandes y pequeños (n_L, n_s). En todos los paneles (A-D) se ha empleado el mismo código de colores en orden ascendente de los valores de las variables, es decir, el valor más pequeño y el más grande corresponden, progresivamente, con los colores amarillo, rosa, verde, azul y rojo respectivamente. Con el objetivo de aclarar dicha correlación, en la **Tabla 6-3** aparecen resumidos los valores empleados para el caso de Marte (**Tabla 6-1**) junto a las correspondientes líneas de color.

Tabla 6-3. Resumen de los valores empleados en el estudio comparativo de la variación temporal del campo eléctrico en función de r_L , r_S , n_L , n_S y W , para las figuras Figura 6-6 y Figura 6-7.

Color línea	Amarilla	Rosa	Verde	Azul	Roja
r_L (μm)	10	20	30	50	-
r_S (μm)	0.5	1	5	-	-
n_L (kg/m^3)	1	5	10	15	30
n_S (kg/m^3)	10	30	50	70	100
W (m/s)	4	10	25	50	100

A continuación se describen los principales resultados deducidos a partir de los resultados de la Figura 6-8:

PANEL A

Muestra la evolución del campo eléctrico con el tiempo en el interior de un *dust devil* para diferentes valores, r_L . A la vista de los resultados, el tamaño de las partículas pequeñas no sólo afecta a los valores del potencial eléctrico de ruptura sino a la evolución del mismo. A medida que el valor de r_L aumenta (desde 10 a 50 μm):

- ∞ los valores de ruptura alcanzados varían desde 1 kV/m hasta 200 kV/m.
- ∞ se necesita menos tiempo para alcanzar valores altos de campo eléctrico.

PANEL B

En este caso se han comparado los valores de campo eléctrico bajo diferentes valores de, r_S (0.5-5) μm . A mayor valor del radio en los 50 s simulados:

- ∞ los valores de ruptura del campo eléctrico varían entre 6 kV/m y 20 kV/m
- ∞ la evolución del campo es bastante similar para los tres casos presentados, alcanzando los valores de campo eléctrico de una forma muy progresiva

En comparación con el caso anterior, es evidente cómo el tamaño de los granos grandes afecta de una forma más significativa al campo eléctrico, no sólo en los valores sino en la evolución del mismo.

PANEL C

En relación a los valores de n_L se ha variado este valor desde 1 kg/m³ hasta 30 kg/m³. A la vista de los resultados se obtiene que

- ∞ los valores de ruptura oscilan en más de un orden de magnitud en función del valor de n_L , variando entre 10 kV/m y 300 kV/m.
- ∞ también se observa cómo este parámetro tiene una clara influencia sobre su evolución, ya que para valores pequeños de n_L necesita más tiempo para alcanzar un valor cuasi-constante del campo eléctrico.

PANEL D

Los resultados obtenidos al introducir variaciones únicamente en los valores de n_s , desde 10 kg/m³ hasta 100 kg/m³ muestran

- ∞ que los valores de ruptura obtenidos varían entre 2 kV/m para el valor más pequeño de n_s y 20 kV/m para el valor más grande.
- ∞ que para valores grandes de n_s , mayores de 20 kg/m³, se alcanzan en cortos periodos de tiempo un valor cuasi-estable del campo eléctrico, mientras que para valores pequeños, el tiempo necesario es mucho mayor.

Comparando los resultados del PANEL C y del PANEL D, se concluye que a mayor densidad de partículas grandes, mayor efecto sobre los valores de campo eléctrico. Así mismo, tal y como sería esperable, la evolución del campo eléctrico se ve afectada, principalmente, cuando tenemos mayor concentración de partículas grandes que pequeñas.

A la vista de los resultados mostrados, el tamaño de las partículas es el principal responsable de los grandes cambios en los valores y evolución del campo eléctrico. Por este motivo se ha estudiado la diferencia en el campo eléctrico en función de las diferencias entre los radios de los. Es decir, en lugar de asumir dos poblaciones bien diferenciadas en tamaño, se ha estudiado la evolución temporal del campo eléctrico cuando las diferencias entre los tamaños cada vez son menores. Con este propósito se han representado los valores del campo eléctrico para los diferentes valores de r_s (Figura 6-9).

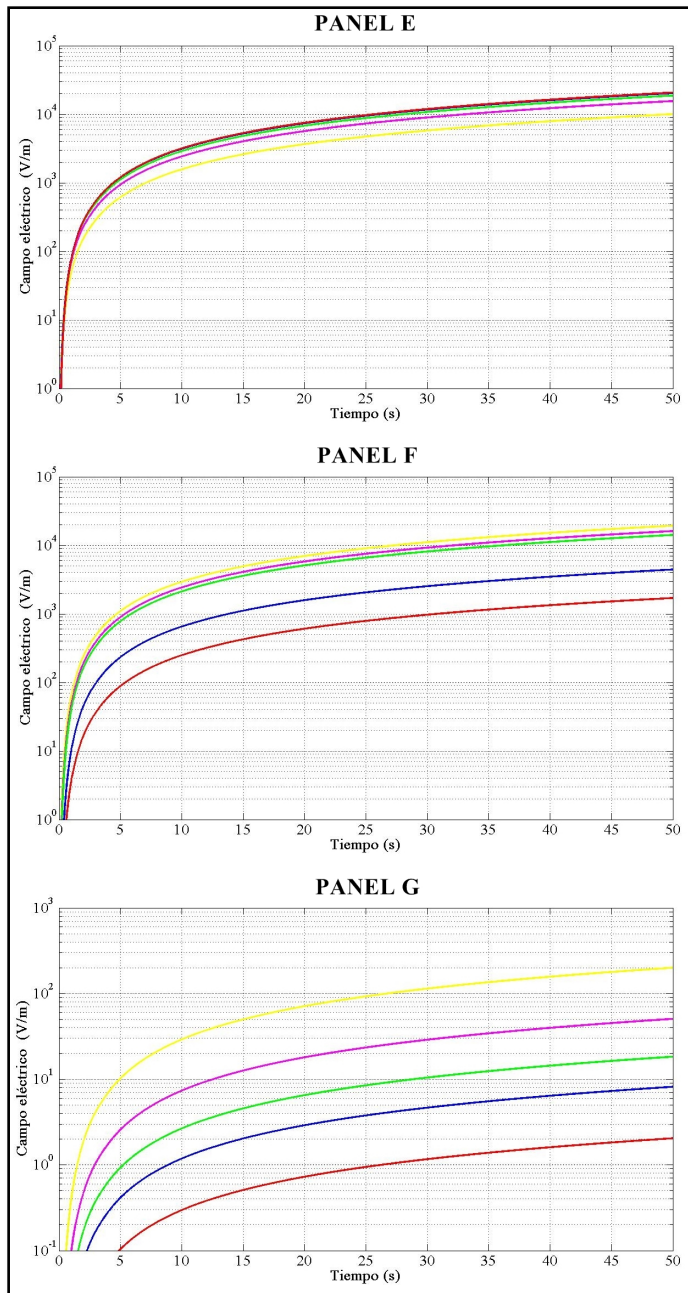


Figura 6-9. Evolución del campo eléctrico con el tiempo para diferentes valores de r_s , cuando tiende a alcanzar el valor de r_L .

Panel A: $r_s = 1$ (amarillo), 2 (rosa), 3 (verde), 4 (azul) y 5 (rojo);

Panel B: $r_s = 7$ (amarillo), 9 (rosa), 10 (verde), 15 (azul) y 17 (rojo);

Panel C: $r_s = 19.0$ (amarillo), 19.5 (rosa), 19.7 (verde), 19.8 (azul) y 19.9 (rojo).

Tal y como se ha comprobado a partir de la **Figura 6-9**, existe una clara influencia en los valores del campo eléctrico, del radio de las partículas. Sin embargo, se puede apreciar un claro cambio en el comportamiento del campo en función del tamaño de los granos. Gracias a la **Figura 6-9** se ha obtenido información más detallada acerca de dicho efecto.

PANEL E

En este caso se han seleccionado cinco valores de r_s comprendidos entre (1-5) μm y se han representado los correspondientes valores de campo eléctrico

- ∞ los potenciales de ruptura alcanzados oscilan entre 10 kV/m y 20 kV/m, lo cual no representa una gran diferencia. Estos valores aumentan al aumentar el tamaño de los granos pequeños, tal y como se ha mostrado anteriormente.
- ∞ así mismo, la evolución del campo eléctrico muestra un comportamiento muy similar para estos cinco casos representados.

PANEL F

En el PANEL F, los valores seleccionados para el radio de los granos pequeños varían entre (7-17) μm . El análisis de los resultados muestran que

- ∞ a medida que el valor de r_s se acerca al tamaño del grano grande, los valores de campo eléctrico van disminuyendo, alcanzando valores de ruptura comprendidos entre 20 kV/m y ~ 2 kV/m.
- ∞ en cuanto a la evolución del campo, a medida que aumenta el valor de r_s es necesario más tiempo para alcanzar un valor cuasi-estable del campo

PANEL G

En el último panel, los valores de r_s han sido seleccionados progresivamente desde 19 μm hasta 19.9 μm , cubriendo el rango más próximo al valor del radio de los granos grandes, $r_L = 20 \mu\text{m}$. Los resultados obtenidos por dicha figura son muy similares a los mostrados en el PANEL F

- ∞ los potenciales de ruptura varían según aumenta r_s desde 200 V/m hasta 20

- ∞ por otra parte, al igual que en el caso anterior, según aumenta el radio mayor es el tiempo necesario para alcanzar el campo eléctrico.

Para observar de forma más clara el efecto que el aumento de r_s hasta prácticamente el valor de r_L tiene sobre el campo eléctrico, en la **Figura 6-10** se han representado los valores del campo eléctrico a los 10 s, 20 s y 30 s, para cada uno de los paneles anteriores (PANELES E-G).

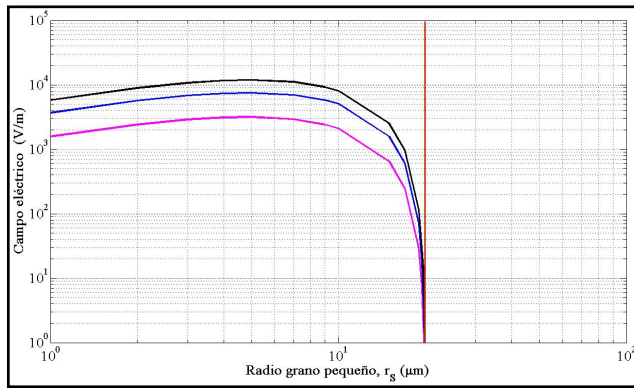


Figura 6-10. Valores de campo eléctrico calculados para valores de r_s cuando se aproximan a r_L . En rosa, se muestran los valores obtenidos a los 10 s, en azul a los 20 s y en negro a los 30 s. La línea roja muestra el valor del radio de los granos grandes.

Los resultados muestran claramente un comportamiento bien diferenciado para valores de $r_s < 5 \mu\text{m}$ y para $r_s > 5 \mu\text{m}$. En el primer caso, los valores del campo eléctrico aumentan a medida que aumenta el valor de r_s , tanto a los 10 s, 20 s como a los 30 s. Sin embargo, esto no corresponde con el comportamiento esperado. A medida que los tamaños de ambos granos se vuelven iguales, ambas poblaciones de partículas no pueden ser separadas, provocando que el *dust devil* se convierta en una nube de polvo neutra con campo eléctrico nulo (línea roja de la **Figura 6-10**).

A pesar de que no hay una respuesta bien definida para el comportamiento del primer caso, el principal motivo puede residir en el valor tan bajo del radio de los granos pequeños, ya que este tipo de granos no

presentan el mismo comportamiento que las partículas más grandes. Se considera que sobre estos granos actúa fundamentalmente el viento, provocando que se eleven mucho más rápidamente que el resto de las partículas. De este modo las diferencias entre las velocidades de las partículas son muy grandes y negativas, lo que conlleva a valores altos de campo eléctrico.

Por último se ha estudiado el efecto del viento, W , sobre el campo eléctrico en el interior de un *dust devil*. En este sentido se ha representado la evolución temporal del campo eléctrico (Figura 6-11) para diferentes valores de viento (4-100 m/s) según lo reflejado en la Tabla 6-3.

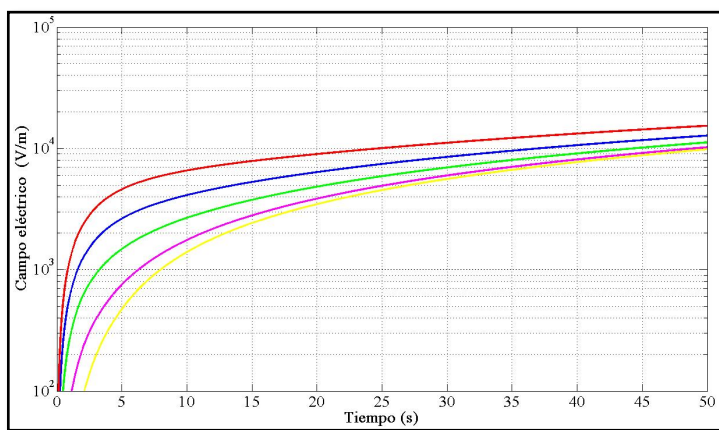


Figura 6-11. Evolución del campo eléctrico para diferentes valores del viento.
 W (m/s)= 4 (amarillo), 10 (rosa), 25 (verde), 50 (azul), 100 (roja).

El efecto del viento resulta más evidente en la evolución del campo eléctrico. A medida que aumenta la magnitud del viento, disminuye considerablemente el tiempo necesario para alcanzar el valor de campo eléctrico cuasi-estable, ya que las diferencias entre las velocidades de ambas poblaciones de granos se vuelve mayor, lo cual genera un aumento en el valor del campo, así como una disminución del tiempo necesario para alcanzarlo. Sin embargo, para los cinco casos simulados el potencial de ruptura alcanzado es bastante similar para todos ellos, oscilando entre los ~ 10 kV/m y los ~ 16 kV/m.

6.4. Datos campo eléctrico

Hasta el año 2015 no ha existido ninguna misión a Marte en la que se haya incluido un instrumento capaz de registrar los valores de campo eléctrico en el planeta. Sin embargo, en los próximos años parece que este hecho puede hacerse realidad, ya que el instrumento MicroARES (Atmospheric Radiation and Electricity Sensor) que viajará a bordo de la misión a Marte ExoMars 2016, está preparado para realizar dichas medidas sobre la superficie. ExoMars es un proyecto desarrollado conjuntamente por la Agencia Espacial Europea (ESA) y apoyado por la Agencia Espacial Federal Rusa para enviar un orbitador, un aterrizador (*lander*) fijo y dos exploradores (*rovers*) a Marte. Entre sus múltiples objetivos destacan: la búsqueda de posible vida, tanto pasada como presente y la toma de medidas in situ de valores de campo eléctrico, viento, humedad, presión...

El instrumento MicroARES está diseñado a partir de una placa electrónica y un procesador capaz de analizar los datos en tiempo real. El electrodo detector se sitúa a 27 cm de la superficie, en lo alto de una antena. En la actualidad, el instrumento se encuentra en fase de prueba en diferentes escenarios. La más reciente se realizó durante una campaña en el desierto de Marruecos, a mediados del año 2013. Durante dicha campaña se tomaron medidas de presión, temperatura, humedad, campo eléctrico, irradiancia solar, dirección y velocidad del viento. También se contó con dos sensores que permiten determinar la abundancia y distribución de los granos de polvo. Se pretende utilizar los resultados obtenidos a partir de esta campaña como valores de referencia para calibrar los instrumentos. De esta forma se podrán obtener resultados mucho más fiables y concluyentes de las medidas que se realicen en Marte.

6.5. Discusión III

En este Capítulo se ha planteado el estudio de la interacción entre las partículas de polvo en el interior de un *dust devil*, capaces de generar un campo eléctrico. Con este objetivo se ha revisado en primer lugar la metodología empleada por otros autores (Farrell et al., 2003), los cuales emplean el método de Runge-Kutta

para resolver la ecuación de continuidad que rige el movimiento de estas partículas. A partir de estos resultados, en esta Tesis se propone un nuevo método de resolución a partir de la discretización de la ecuación (6.1). El esquema numérico propuesto (6.2) se basa en el descrito en el Capítulo 4, el cual permite reproducir de forma exacta los resultados presentados por otros autores. En lo que se refiere a los resultados, se han estudiado tres casos diferentes a partir de la discretización de la ecuación (6.1).

- * Caso 1.- Considerar únicamente las fuerzas asociadas a las variaciones de la carga (granos grandes) con el tiempo para diferencias entre las velocidades de los granos constantes.
- * Caso 2.- Considerar únicamente el segundo término de la derecha de la ecuación, donde entran en juego las aceleraciones de los granos para valores de carga de los granos grandes constantes.
- * Caso 3.- Se consideran los dos términos, asumiendo variaciones con el tiempo de la carga de los granos de mayor tamaño.

A partir del caso 1, además de verificar los resultados con los obtenidos por el método de Runge-Kutta se han obtenido los potenciales de ruptura para Marte y para la Tierra, resultando ~ 10 kV/m y ~ 20 kV/m respectivamente. Dichos valores coinciden exactamente con los esperados, permitiendo validar la fiabilidad del esquema propuesto.

A continuación, se analizaron los resultados obtenidos a partir de los tres casos propuestos, con la intención de analizar la relevancia de las fuerzas estudiadas. A la vista de los resultados se puede concluir que el efecto del término asociado a las aceleraciones provoca variaciones en la forma de evolución del campo así como en los valores del potencial de ruptura. Sin embargo, no existe demasiada diferencia entre los efectos de éste término sólo y los que resultan de considerar los dos términos a la vez con una carga variable en los granos grandes.

Por último se ha realizado una serie de estudios relacionados con la influencia de las diferentes variables que intervienen a la hora de obtener los valores del campo eléctrico. Se ha podido concluir que el tamaño de las partículas, fundamentalmente las grandes, así como la densidad de las mismas

influyen notablemente en los valores del campo así como en la evolución del mismo. No hay que olvidar que el efecto del viento también modifica considerablemente los resultados en lo que se refiere en los tiempos necesarios para alcanzar el valor de campo cuasi-estable, no así en el valor del potencial de ruptura.

Toda esta información puede resultar de gran interés a la hora de calibrar los instrumentos de cara a realizar misiones en otros planetas, ya que permitiría ajustar los rangos con mayor fiabilidad en los resultados.

CAPÍTULO

7

CONCLUSIONES



CONCLUSIONS

A continuación se resumen las principales conclusiones extraídas de cada uno de los estudios presentados en los capítulos anteriores.

Como se ha descrito al principio de esta Tesis, el trabajo presentado se puede dividir en tres bloques. La primera parte corresponde al estudio de las partículas cargadas eléctricamente bajo la acción de diferentes campos magnéticos.

- ∞ En primer lugar se ha comparado la aproximación Cartesiana (4.11) propuesta con los resultados obtenidos por Störmer (Störmer, 1907). Los resultados mostrados han permitido confirmar la validez de las expresiones propuestas, al reproducir los resultados deducidos por Störmer, obteniéndose los pozos de potencial correspondientes a un electrón y un protón.
- ∞ Se ha propuesto un esquema numérico en coordenadas Cartesianas que permite describir las trayectorias para cualquier tipo de partícula eléctrica (electrones, protones, partículas alfa...) cuando se analiza su movimiento en un campo magnético general.
- ∞ A partir del esquema se han obtenido las trayectorias confinadas para un electrón, un protón y una partícula alfa, bajo diferentes configuraciones de campo magnético: una fuente de forma esférica, cilíndrica y la combinación lineal de ambas. Todos los cálculos se han desarrollado bajo las condiciones características marcianas.
- ∞ Por último se ha estudiado el momento angular de una partícula. En este caso se ha analizado el movimiento de un electrón en un campo magnético constante y en un campo magnético dipolar. Para ambos casos se han obtenido los mismos resultados tanto desde un punto de vista discreto (4.39 y 4.40) como continuo (4.21 y 4.26).
- ∞ Todos los resultados se han recogido en dos publicaciones Ramírez-Nicolás et al., 2014, y Ramírez-Nicolás et al., 2015 (enviado).

En la segunda parte, nos hemos centrado en la interacción del viento solar (partículas cargadas eléctricamente), con la ionosfera marciana. Para este estudio se han utilizado los ionogramas obtenidos del radar MARSIS a bordo de

la misión Mars Express, de tres órbitas diferentes 3151, 9316 y 6788. A partir de dicha información se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- ∞ Tras la comparación de las órbitas 9316 (sin campo) y 3151 (con campo) es posible observar y confirmar una compresión de la ionosfera en ésta última órbita. Dicha compresión viene caracterizada por una disminución en los valores de la altura de escala del plasma, así como por un cambio de tendencia en la misma.
- ∞ Para la órbita 3151 ha sido posible establecer dos valores para la altura de escala, uno que corresponde a la región de la ionosfera regido por procesos fotoquímicos y el otro para la región de la ionosfera gobernada por fenómenos de transporte.
- ∞ Para las órbitas en las que se han podido identificar ambas alturas de escala, se ha podido establecer una altura de transición, la cual marca el final de la penetración del campo magnético inducido.
- ∞ A partir del balance de presiones entre la ionosfera y el viento solar, se han obtenido valores de temperatura del plasma que están en perfecto acuerdo con los presentados en estudios previos (Shinagawa and Cravens, 1989). Así mismo, a partir de dicho balance se ha estimado el valor del campo magnético inducido a la altura de transición. Los resultados han sido confirmados con los valores obtenidos a partir de modelos ionosféricos teóricos.
- ∞ Por último, se ha realizado un estudio análogo para la órbita 6788. En este caso se puede apreciar también una compresión. Sin embargo, no se puede asumir como un resultado absoluto ya que dicha órbita se encuentra sobre una zona de Marte donde se han detectado fuertes anomalías magnéticas corticales.
- ∞ Todos los resultados quedan recopilados en una publicación, Ramírez-Nicolás et al., 2015 (enviado).

La tercera y última parte, está centrada en el estudio de la evolución del campo eléctrico en el interior de un *dust devil*, generado por la interacción de las partículas de polvo. Los resultados de dicho estudio quedan recogidos en los siguientes puntos.

- ∞ Se ha propuesto un nuevo método de resolución de la ecuación (6.1) a partir de la discretización de la misma (empleando para ello los conceptos descritos en el Capítulo 4). Dicho método proporciona resultados que están en perfecta concordancia con los mostrados en trabajos previos (Farrell et al., 2003, 2006).
- ∞ El esquema propuesto tan sólo necesita de los valores de las dos poblaciones que entran en interacción (tamaño y densidad), así como las condiciones atmosféricas características del entorno (densidad y conductividad atmosférica, y valor del viento).
- ∞ A partir del esquema propuesto se han estudiados tres casos particulares en función de las fuerzas que se han tenido en cuenta:
 - * **Caso 1.-** Considerar únicamente las fuerzas asociadas a las variaciones de la carga (granos grandes) con el tiempo, para diferencias entre las velocidades de los granos constantes.
 - * **Caso 2.-** Considerar únicamente el segundo término de la derecha de la ecuación, donde entran en juego las aceleraciones de los granos para valores de carga de los granos grandes constantes.
 - * **Caso 3.-** Considerar los dos términos, asumiendo variaciones con el tiempo de la carga de los granos de mayor tamaño.
- ∞ A partir del caso 1, se ha realizado una comparativa de los valores del potencial de ruptura para la Tierra y Marte, obteniéndose valores de unos ~ 10 kV/m y ~ 20 kV/m respectivamente. Dichos valores han resultado estar en perfecta concordancia con los descritos por otros autores (Farrell et al., 2006; Kok and Renno, 2009). Por otra parte se ha analizado cómo afectan cada uno de los parámetros que intervienen en la obtención de los valores del campo. Se concluye que los valores de densidad y del radio de los granos grandes son los que introducen variaciones mayores tanto en los valores como en la evolución del campo eléctrico. El viento, ha resultado ser otro de los parámetros que más influyen en los resultados, pero fundamentalmente en la evolución de los primeros instantes.

- ∞ El caso 2 y 3, difieren en la forma de la evolución en los primeros instantes, lo cual permite asegurar que el efecto de la aceleración de las partículas, así como una carga variable con el tiempo son más relevantes en comparación con las diferencias entre las velocidades de los granos.
- ∞ Los resultados serán publicados en un artículo que actualmente se encuentra en preparación.

Hereafter, the main conclusions from each chapter of this Thesis are summarized.

As described at the beginning of this Thesis, the work presented here can be divided into three blocks. The first part is the study of electrically charged particles under the influence of different magnetic fields particles.

- ∞ First, the proposed Cartesian approach (4.11) was compared with the results obtained by Störmer (Störmer, 1907). The results confirm the validity of the proposed expressions to reproduce the results from Störmer, yielding the corresponding potential wells of an electron and a proton.
- ∞ A new numerical scheme in Cartesian coordinates has been proposed for describing the trajectories for any kind of electrical particle (electrons, protons, alpha particles ...), when are under the effect of any magnetic field without any restriction.
- ∞ From the numerical scheme has been obtained confined trajectories for electrons, protons and alpha particles, under different magnetic field configurations from magnetized sources: sphere, cylinder and the linear combination between them. All calculations have been developed under the martian conditions.
- ∞ Finally, the angular momentum of a particle has been studied. In this case the motion of an electron in a constant magnetic field and in a dipole magnetic field has been analyzed. In both cases, the same results from both a discrete (4.39 and 4.40) and continuous view(4.21 and 4.26) have been obtained.
- ∞ All results have been collected in two publications Ramirez-Nicolás et al., (2014), and Ramirez-Nicolas et al., (2015) (submmited).

In the second part, the work was focused on the interaction between the solar wind (electrically charged particles), and the martian ionosphere. For this study the ionograms obtained from MARSIS radar on board the Mars Express mission were used for three different orbits 3151, 9316 and 6788. From this information it has been possible to draw the following conclusions:

- ∞ Upon comparison of the orbits 9316 (no magnetic field) and 3151 (with magnetic field) can be observed and confirmed a compression of the ionosphere in the latter orbit. Such compression is characterized by a decrease in the values of the scale height of the plasma as well as a turnaround in the same.
- ∞ For 3151 orbit has been possible to establish two values for the plasma scale height, one corresponding to the region of the ionosphere governed by photochemical processes and the other to the region governed by the transport mechanism.
- ∞ For orbits with both plasma scale heights, it has been possible to establish a transition altitude which limits the end of penetration of the induced magnetic field.
- ∞ The plasma temperature values obtained from the balance of pressures between the ionosphere and the solar wind are in very good agreement with values reported in previous studies (Shinagawa and Cravens, 1989). The value of the magnetic field induced at the transition altitude, has been also estimated from that balance. These values were confirmed with those obtained from theoretical ionospheric models.
- ∞ Finally, a similar study has been applied for the 6788 orbit. Again, it is possible to see the compression but it can't be taken as an absolute result because this orbit is located over an area of Mars where strong crustal magnetic anomalies are detected.
- ∞ All these results are compiled in a publication Ramírez-Nicolás et al., (2015) (submitted).

The third and final part was focused on the study of the evolution of the electric field inside a dust devil, generated by the interaction of dust particles. The results of this study are reported in the following points.

- ∞ A new method for solving the equation (6.1), from the discretization of it (as described in Chapter 4) has been proposed. This method provides results that are in perfect agreement with those shown in previous studies (Farrell et al., 2003, 2006).

- ∞ The proposed scheme only requires the values of the two populations which interact (size and density), as well as environmental characteristics like atmospheric conditions (air density and conductivity and the value of wind).
- ∞ From the proposed scheme we have studied three particular cases depending on the forces that have been considered:
 - * **Case 1.-** Consider only the forces associated with the charge variations (large grains) to the time for constants differences between the speeds of grains.
 - * **Case 2.-** Consider only the second term on the right hand of the equation, where the accelerations of the grains for constant charge of the large grains come into play.
 - * **Case 3.-** Two terms are considered, assuming variations with time of the charge for larger grains.
- ∞ From case 1, it has been made a comparison of breakdown values on Earth and Mars, obtaining values of ~ 10 kV/m and ~ 20 MV/m respectively. These values have been found to be in perfect agreement with those expected, described by other authors (Farrell et al., 2006; Kok and Renno, 2009). Moreover, it has been analyzed the way the model parameters affect the field values. We conclude that the density values and the radius of the large grains introduce major changes both in value and in the evolution of the electric field. The wind has proven to be one of the parameters that also have the highest influence on the results (mainly in the first seconds of the electric field evolution).
- ∞ From case 2 and 3 the results indicate that the effect of acceleration of the particles and the presence of a time variable charge are more relevant than the differences between the speeds of the grains.
- ∞ The results will be published in a scientific article which is currently in preparation.

CAPÍTULO

8

TRABAJO FUTURO



FUTURE WORK

En base a los resultados descritos a lo largo de esta Tesis Doctoral, a continuación se enumeran las ideas más importantes relacionadas con la ampliación del trabajo, con el objetivo de continuar la investigación científica de cada una de las tres líneas presentadas:

- ∞ Identificación de auroras (Bertaux et al., 2005) en las zonas con fuerte presencia de campo magnético cortical (modelo de Cain et al., (2003)) a partir del comportamiento (trayectorias) de las partículas cargadas en dicho entorno. De esta forma se podrían entender mejor los mecanismos de precipitación de las partículas así como el origen de las mismas, e identificar su presencia sin necesidad de datos adicionales.
- ∞ Definir las contribuciones del campo magnético inducido así como del campo magnético cortical en las medidas de campo magnético realizadas por Mars Express a la altura de la nave. De esta forma sería posible cuantificar el efecto del campo magnético sobre la ionosfera en las zonas con presencia de anomalías corticales.
- ∞ Analizar en detalle el comportamiento de la altura de escala del plasma, así como de las alturas de transición en aquellas órbitas obtenidas sobre regiones con fuertes anomalías magnéticas.
- ∞ Estudiar con mayor detalle los valores obtenidos del campo magnético a partir del balance de presiones entre el viento solar y la ionosfera, con objeto de poder compararlos con los medidos por MAVEN. De esta forma se tendría un conocimiento más detallado de este proceso.
- ∞ Desarrollar un modelo de simulación del movimiento de un *dust devil* que permita conocer mejor la distribución de los granos que intervienen en el proceso así como el intercambio de carga, y campo eléctrico, en cada instante.

Based on the results described throughout this Thesis, the most important ideas related to the expansion of the work, with the aim of continuing the scientific research of each of the three lines presented, are listed below:

- ∞ Identify martian auroras (Bertaux et al., 2005) in areas with a strong presence of crustal magnetic field (Cain et al., (2003) model) by using the behavior (trajectories) of charged particles in such environment. Thus, the mechanism of the particles and the origin of the auroras (from the interacting particles point of view) would be better understood without the need of additional data.
- ∞ Define the contributions of the induced and cortical magnetic on the magnetic fields values measured at the height of the Mars Express spacecraft. Thus, it would be possible to quantify the effect of the induced magnetic field on the ionosphere in areas with presence of cortical anomalies.
- ∞ Analyze in detail the behavior of the scale height of the plasma and the height transition in those orbits recorded over regions with strong magnetic anomalies.
- ∞ Study in more detail the values of the magnetic fields obtained from the pressure balance between solar wind and the martian ionosphere, in order to compare it with the data recorded by MAVEN. In this sense, a better knowledge of the ionospheric processes could be acquired.
- ∞ Develop a simulation model of the movement of a dust devil that allows to better know the distribution of grains involved in the process, their charge exchange, as well as the electric field evolution, achieved at every moment.

CAPÍTULO

9

REFERENCIAS

- Acuña, M.H., Connerney, J.E.P., Wasilewski, P., Lin, R.P., Anderson, K.A., Carlson, C.W., McFadden, J., Curtis, D.W., Réme, H., Cros, A., Médale, J.L., Sauvaud, J.A., d'Uston, C., Bauer, S.J., Cloutier, P., Mayhew, M., Ness, N.F. Mars observer magnetic fields investigation, *J. Geophys. Res* 97, 7799-7814, 1992.
- Acuña, M.H., Connerney, J.E.P., Wasilewski, P., Lin, R.P., Anderson, K.A., Carlson, C.W., McFadden, J., Curtis, D.W., Mitchell, D., Réme, H., Mazelle, C., Sauvaud, J.A., d'Uston, C., Cros, A., Medale, J.L., Bauer, S.J., Cloutier, P., Mayhew, M., Winterhalter, D., Ness, N.F. Magnetic Field and Plasma Observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor Mission, *Science* 279, 1676-1680, 1998.
- Acuña, M.H., Connerney, J.E., Ness, N.F., Lin, R.P., Mitchell, D., Carlson, C.W., McFadden, J., Anderson, K.A., Réme, H., Mazelle, C., Vignes, D., Wasilewski, P., Cloutier, P. Global distribution of crustal magnetism discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment, *Science* 284, 790-793, 1999.
- Akalin, F., Morgan, D.D., Gurnett, D.A., Kirchner, D.L., Brain, D.A., Modolo, R., Acuña, M.H., Espley, J.R. Dayside induced magnetic field in the ionosphere of Mars, *Icarus* 206, 104-111, 2010.
- Applebaum, J., Landis, G.A., and Sherman, I. Solar energy on Mars: Stationary collectors, *J. Propul. Power* 11, 554, 1993.
- Arkani-Hammed, J. Paleomagnetic pole positions and pole reversals of Mars, *J. Geophys. Res* 28, 3409-3412, 2001.
- Arkani-Hammed, J. A 50-degree Spherical Harmonic Model of the Magnetic Field of Mars, *J. Geophys. Res* 106 (E10), 23197-23208, 2001a.
- Arkani-Hammed, J. A coherent model of the crustal magnetic field of Mars, *J. Geophys. Res* 109, E9, 2004.
- Atreya, S.K., Wong, A.S., Renno, N.O., Farrell, W.M., Delory, G.T., Sentman, D.D., Cummer, S.A., Marshall, J.R., Rafkin, S.C., Cattling, D.C. Oxidant enhancement in martian dust devils and storms: Implications for life and habitability, *Astrobiology* 6, 439-450, 2006.
- Bagnold, R.A. The physics of blown sand and desert dunes, Methuen, London, 241 pp, 1941.

- B**auer, S.J., Brace, L.H., Hunten, D.M., Intriligator, D.S., Knudsen, W.C., Nagy, A.F., Russell, C.T., Scarf, F.L. The Venus ionosphere and solar wind interaction, *Space Sci. Rev* 20, 413-430, 1977.
- B**elehaki, A., Zolesi, B., Juren, C., Dialetis, D., Stanislawska, I., Bremer, J., Cander, L., Hatzopoulos. Monitoring and forecasting the ionosphere over Europe: the DIAS Project, *Space Weather* 4, 12, 2006.
- B**ell, J.F., McSween Jr, H.Y., Crisp, J.A., Morris, R.V., Murchie, S.L., Bridges, N.T., Johnson, J.R., Britt, D.T., Golombek, M.P., Moore, H.J., Ghosh, A., Bishop, J.L., Anderson, R.C., Brückner, J., Economou, T., Greenwood, J.P., Gunnlaugsson, H.P., Hargraves, R.M., Hviid, S., Knudsen, J.M., Madsen, M.B., Reid, R., Rieder, R., Soderblom, L. Mineralogical and compositional properties of martian soil and dust: results from Mars Pathfinder, *J. Geophys. Res* 105, 1721, 2000.
- B**ertaux, J., Leblanc, F., Perrier, S., Quemerais, E., Korablev, O., Dimarellis, E., Reberac, A., Forget, F., Simon, P.C., Stern, S.A., Sandel, B., SPICAM Team. Nightglow in the upper atmosphere of Mars and implications for atmospheric transport, *Science* 307, 566-569, 2005a.
- B**ertucci, C., Mazelle, C., Acuña, M.H., Russell, C.T., and Slavin, J.A. Structure of the magnetic pileup boundary at Mars and Venus, *J. Geophys. Res* 110(A1), 2005.
- B**inbin, N., Shprits, Y.Y., Friedel, R.H.W., Thorne, R.M., Daae, M., Chen, Y. Responses of Earth's radiation belts to solar wind dynamic pressure variations in 2002 analyzed using multisatellite data and Kalman filtering, *J. Geophys. Res* 118, 4400-4414, 2013.
- B**lakely, R.J. Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press, Cambridge, 437, 1995.
- B**lanchard, A. Angular fluctuations in the cosmological microwave background in a universe with cosmological constant, *Astron. Astrophys* 132, 359, 1984.
- B**lelly, P.-L., Lathuillère, Emery, B., Lilensten, J., Fontanari, J., Alcaydé, D. An extended TRANSCAR model including ionospheric convection: simulation of EISCAT observations using inputs from AMIE, *Ann. Geophys* 23, 419-431, 2005.
- B**rain, D.A., Halekas, J.S., Eastwood, J.P. The induced magnetotails of Mars and Venus: A tale of two tails, Fall AGU, 2010.

- Cain, J. C., Ferguson, B.B., and Mozzoni, D. An $n = 90$ internal potential function of the martian crustal magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 108(E2), 5008, 2003.
- Cantor, B.A., James, P.B., Caplinger, M. and Wolff, M.J. martian dust storms: 1999 Mars Orbiter Camera observations, *J. Geophys. Res* 106, 23653-23687, 2001.
- Cantor, B.A., Malin, M.C., and Edgett, K.S. Multiyear Mars Orbiter Camera (MOC) observation of repeated martian weather phenomena during the northern summer season, *J. Geophys. Res* 107(E3), 5014, 2002.
- Chicarro, A., Martin, P., and Traunter, R. Mars Express: A European misión to the red planet. European Space Agency Publication Division. SP-1240, 3-16, Noordwijk, Netherlands, 2004
- Clancy, R.T., Sandor, B.J., Michaels, J.W., Michael, D.S., Lefèvre, F., Madeleine, J.-B., Forget, F., Murchie, S.L., Seelos, F.P., Seelos, K.D., Nair, H.A., Toigo, A.D., Humm, D., Kass, D.M., Kleinböhl, Heavens, N. Extensive MRO CRISM observations of $1.27\ \mu\text{m}$ O₂ airglow in Mars polar night and their comparison to MRO MCS temperature profiles and LDM GCM simulations, *J. Geophys. Res. Planets* 118, 1-1, 2012.
- Connerney, J.E.P., Acuña, M.H., Wasilewski, P.J., Ness, N.F., Rème, H., Mazelle, C., Vignes, D., Lin, R.P., Mitchell, D.L., Cloutier, P.A. Magnetic lineations in the ancient crust of Mars, *Science* 284, 749-798, 1999.
- Connerney, J.E.P., Acuña, M.H., Wasilewski, P.J., Kletetschka., Ness, N.F., Rème, H., Lin, R.P., Mitchell, D.L. The Global Magnetic Field of Mars and Implications for Crustal Evolution, *Geophys. Res. Lett* 28, 21, 4015-4018, 2001.
- Connerney, J.E.P., Acuña, M.H., Ness, N.F., Spohn, T., and Schubert, G. Mars crustal magnetism, *Space Sci. Rev* 111, 1-32, 2003.
- Cravens, T.E. Physics of the solar system plasmas, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- Crider, D.H., Brain, D.A., Acuña, M.H., Vignes, D., Mazelle, C., Bertucci, C. Mars Global Surveyor observations of solar wind magnetic field draping around Mars, *Space Sciences Series of ISSI* 18, 203-2011, 2004.
- Crozier, W.D. The Electric Field of a New Mexico Dust Devil, *J. Geophys. Res* 69, 5427, 1964.

- Curtis, S.A., and Ness, N.F.** Remanent magnetism at Mars. *Geophys. Res. Lett* 15, 1988.
- Delory, G.T., Farrell, W.M., Atreya, S.K., Renno, N.O., Wong, A.S., Cummer, S.A., Setman, D.D., Marshall, J.R., Rafkin, S.C., Catting, D.C.** Oxidant enhancement in martian dust devils and storms: Storm electric fields and electron dissociative attachment, *Astrobiology*, 6(3), 451-462, 2006.
- Desch, S.J., and Cuzzi, J.N.** The generation of lightning in the solar nebula, *Icarus*, 143, 87, 2000.
- Dièval, C., Kallio, E., Barabash, S., Stenberg, G., Nilsson, H., Futaana, Y., Holmström, M., Fedorov, A., Frahm, R.A., Jarvinen, R., Brain, D.A.** A case study of proton precipitation at Mars: Mars Express observations and hybrid simulations, *J. Geophys. Res* 117, 2012.
- Diloy, P.-Y., Robineau, A., Lilensten, J., Blelly, P.-L., and Fontanari, J.** A numerical model of the ionosphere, including the E-region above EISCAT, *Ann. Geophys* 14, 191-200, 1996.
- Dragt, A.J.** Trapped orbits in a magnetic dipole field, *Rev. Geophys* 3, 255-298, 1965.
- Duff, N., and Lacks, D.J.** Particle dynamics simulation of triboelectric charging in granular insulator systems, *J. Electrostat*, 66, 51-57, 2008.
- Edberg, N.J.T., Lester, M., Cowley, S.W.H., and Erikson, A.I.** Statistical analysis of the location of the martian pileup boundary and bow shock and the influence of crustal magnetic fields, *J. Geophys. Res* 113 (A8), 2008.
- Edberg, N.J.T., Auster, U., Barabash, S., Böswetter, A., Brain, D.A., Burch, J.L., Carr, C.M., Cowley, S.W.H., Cupido, E., Duru, F., Erikson, A.I., Fränz, M., Glassmeier, K.-H., Goldstein, R., Lester, M., Lundin, R., Modolo, R., Nilsson, H., Richter, I., Samara, M., Trotignon, J.G.** Rossetta and Mars Express observations of the influence of high solar wind pressure on the martian plasma environment, *Ann. Geophys* 27, 4533-4545, 2009.
- Edgett, K.S., and Malin, M.C.** New views of Mars eolian activity, materials, and surface properties: Three vignettes from the Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera, *J. Geophys. Res* 105(E1), 1623-1650, 2000.
- Eden, H.F., and Vonnegut, B.** Electrical breakdown caused by dust motion in low-pressure atmospheres: Considerations for Mars, *Science* 180, 962-963, 1973.

- Farrell, W.M., Desch, M.D., Kaiser, M.L., Houser, J., Landis, G.A., Wilt, D.M. Radio and optical detection of martian dust storm discharges, *Acta Astronautica*, 46, 25, 2000.
- Farrell, W.M., Delory, G.T., Cummer, S.A., and Marshall, J.R. A Simple Electrodynamic Model of a Dust Devil, *Geophys. Res. Lett* 30 (20), 2050, 2003.
- Farrell, W.M., Smith, P.H., Delory, G.T., Hillard, G.B., Marshall, J.R., Catling, D., Hecht, M., Tratt, D.M., Renno, N., Desch, M.D., Cummer, S.A., Houser, J.G., Johnson, B. Electric and magnetic signatures of dust devils from the 200-2001 MATADOR desert test, *J. Geophys. Res* 109 (E3), 2004.
- Farrell, W.M., Renno, N., Delory, G.T., Cummer, S.A., and Marshall, J.R. Integration of Electrostatic and Fluid Dynamics within a Dust Devil, *J. Geophys. Res* 111, E01006, 2006a.
- Fisher, J.A., Richardson, M.I., Newman, C.E., Szewast, M.A., Graf, C., Basu, S., Ewald, S.P., Toigo, A.D., Wilson, R.J. A survey of martian dust devil activity using Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera images, *J. Geophys. Res* 110, E03004, 2005.
- Frahm, R.A., Winningham, J.D., Sharber, J.R., Scherrer, J.R., Jeffers, S.J., Coates, A.J., Linder, D.R., Kataria, D.O., Lundin, R., Barabash, S., Holmström, M., Andersson, H., Yamauchi, M., Grigoriev, A., Kallio, E., Säles, T., Riihelä, P., Schmidt, W., Koskinen, H., Kozyra, J.U., Luhmann, G.J., Roelof, E.C., Williams, D.J., Livi, S., Curtis, C.C., Hsieh, K.C., Sandel, B.R., Grande, M., Carter, M., Sauvaud, J.-A., Fedorov, A., Thocaven, J.-J., McKenna-Lawler, S., Orsini, S., Cerulli-Irelli, R., Maggi, M., Wurz, P., Bochsler, P., Krupp, N., Woch, J., Fränz. Carbon dioxide photoelectron energy peaks at Mars, *Icarus* 182, 371-382, 2006.
- Freier, G.D. The Electric Field of a Large Dust Devil, *J. Geophys. Res* 65, 3504, 1960.
- Gierasch, P.J., and Goodoy, R.M. The effect of dust on the temperature of the martian atmosphere., *J. Atmos. Sci* 29, 400-402, 1972.
- Greeley, R., Leach, R., White, B., Iversen, J., and Pollack, J.B. Threshold windspeeds for sand on Mars: Wind tunnel simulations, *Geophys. Res. Lett* 7, 121-124, 1980.

- G**reeley, R., White, R.B., Pollack, J.B., Iversen, J.D., and Leach, R.N. Dust storms on Mars: considerations and simulations, *Geol. Soc. Am (Special paper)* 186, 101-121, 1981.
- G**urnett, D.A., Kirchner, D.L., Huff, R.L., Morgan, D.D., Persoon, A.M., Averkamp, T.F., Duru, F., Nielsen, E., Safaeinili, A., Plaut, J.J., Picardi, G. Radar soundings of the ionosphere of Mars, *Science* 310, 5756, 1929-1933, 2005.
- G**urnett, D.A., Huff, R.L., Morgan, D.D., Persoon, A.M., Averkamp, T.F., Kirchner, D.L., Duru, F., Akalin, F., Kopf, A.J., Nielsen, E., Safaeinili, A., Plaut, J.J., Picardi, G. An overview of radar soundings of the martian ionosphere from Mars Express spacecraft, *Adv. Space Res* 41, 1335-1346, 2008.
- H**alekas, J.S., Delory, G.T., Brain, D.A., Lin, R.P., Fillingim, M.O., Lee, C.O., Mewaldt, R.A., Stubbs, T.J., Farrell, W.M., Hudson, M.K. Extreme lunar surface charging during solar energetic particles events, *Geophys. Res. Lett* 34, L02111, 2007.
- H**arper, W.R. Contact and frictional electrification, Laplacian Press, Morgan Hill, Calif, 1967.
- H**artmann, W.K. Martian cratering V: Toward an empirical martian cronology, and its implications, *Geophys. Res. Lett* 5, 450-452, 1978.
- H**artmann, W.K. Planetary cratering I: Lunar highlands and tsts of hypotheses on crater populations, *Meteoritics* 30, 451, 1995.
- H**oward, J.E., Horányi, M., and Stewart, G.R. Global dynamics of charged dust particles in planetary magnetospheres, *Phys. Rev. Lett* 83, 3993, 1999.
- H**unt, G.R., Lloyd, M.L., and Salisbury, J.W. Mars: Components of infrared spectra and the composition of the dust cloud, *Icarus* 18, 3, 459-469, 1973.
- I**nculet, I.I., Peter Castle, G.D., and Aartsen, G. Generation of bipolar electric fields during industrial handling of powders, *Chem. Eng. Sci* 61, 2249-2253, 2006.
- I**PPC, Climate Cahnge 2007: The physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth Assessment of the intergovernmental panel on Climate change [Solomon, S., et al], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2007.

- Iversen, J.D., Pollack, J.B., Greeley, R., and White, B.R. Saltation threshold on Mars: The effect of interparticle force, surface roughness, and low atmospheric density, *Icarus* 29, 381-393, 1976.
- Jackson, T.J., and Farrell, W.M. Electrostatic fields in dust devils: Analog to Mars, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens* 44, 2942-2949, 2006.
- Jakosky, B.M. and Phillips, R.J. Mars volatile and climate history, *Nature* 412, 237-244, 2001.
- Kasting, J.F. CO₂ Condensation and the climate of early Mars, *Icarus* 94, 1-13, 1991.
- Kellogg, O.D. Foundations of potential theory, Frederick Ungar Publisher, New York, 1929.
- Kelly, M.C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics, Akademik press, New York, 2009.
- Krasnopolsky, V.A. Mars' upper atmosphere and ionosphere at low, médium, and high solar activities: Implications for evolution of wáter, *J. Geophys. Res* 107, E12, 1-11, 2002.
- Kok, J.F., and Renno, N.O. Enhancement of the emission of mineral dust aerosols by electric forces, *Geophys. Res. Lett* 33, L19S10, 2006.
- Kok, J.F., and Renno, N.O. Electrostatics in wind-blown sand, *Phys. Rev. Lett* 100 (1), 014501, 2008.
- Kok, J.F., Parteli, E.J.R., Michaels, T.I., and Karam, D.B. The physics of wind-blown sand and dust, *Rep. Prog. Phys* 75, 10, 2012.
- Krauss, C.E., Horanyi, M., and Robertson, S. Modeling the formation of electrostatic discharges on Mars, *J. Geophys. Res. Planets* 111 (E2), 2006.
- Krymskii, A.M. An interpretation of the large scale ionospheric magnetic fields and the altitude distribution of the ionospheric plasma on the dayside of Venus and Mars, *Venus and Mars: Atmospheres and Solar Wind Interactions*, *Geophys. Monog.* 66, AGU, 1992.
- Krymskii, A.M., Breus, T., and Nielsen, E. On possible evidence in electron density profiles of a magnetic field in the martian ionosphere, *J. Geophys. Res* 100 (A3), 3721-3730, 1995.
- Kuettner, J.P., Sartor, J.D., Levin, Z. Thunderstorm electrification-inductive or non-inductive?, *J. Atmos. Sci* 38, 2470-2484, 1981.

- Landis**, G.A., and Jenkis, P. Measurement of the settling rate atmospheric dust on Mars by MAE instrument on Mars Pathfinder, *J. Geophys. Res* 105, 1855-1857, 2000.
- Lang**, K.R. Astrophysical data-planets and stars, Springer-Verlag, New York, USA, 45-47, 1992.
- Langlais**, B., Purucker, M.E., and Manda, M. Crustal magnetic field of Mars, *J. Geophys. Res-Planet* 109, E02008, 2004.
- Langlais**, B., and Quesnel, Y. New perspectives on Mars' crustal magnetic field, *C. R. Geosci* 340, 791-800, 2008.
- Lanzerotti**, L.J., and Krimigis, S.M. Comparative magnetospheres, *Phys. Today* 38, 24-34, 1985.
- Lillis**, R.J., Frey, H.V., Manga, M., Mitchell, D.L., Lin, R.P., Acuña, M.H., Bougher, S.W. An improved crustal magnetic field map of Mars from electron reflectometry: Highland volcano magnetic history and the end of the martian dynamo, *Icarus* 194, 575-596, 2008.
- Lummerzhim**, D., and Lilensten, J. Electron transport and energy degradation in the ionosphere: Evaluation of the numerical solution, comparison with laboratory experiments and auroral observations, *Ann. Geophys* 12 (10). 1039-1051, 1994.
- Mahjouri**, M.S. Simulation of charged particle motion in Jupiter's magnetosphere, *Acta Phys. Pol* 92 (S21), 1997.
- Martin**, L.J., and Zurek, R.W. An analysis of the history of dust activity on Mars, *J. Geophys. Res* 98, 3221-3246, 1993.
- Mathpal**, K.C., Varshneya, N.C., Dass, N. Precipitation-powered mechanisms of cloud electrification, *Rev. Geophys* 18, 361, 1980.
- Mayhew**, M.A. Inversion of satellite magnetic anomaly data, *J. Geophys* 45, 119-128, 1979.
- Melnik**, O., and Parrot, M. Electrostatic discharge in martian dust Storms, *J. Geophys. Res* 103, 29, 107, 1998.
- Mendillo**, M., Withers, P., Hinson, D., Rishbeth, H., and Reinish, B. Effects of solar flares on the ionosphere of Mars, *Science* 311, 1135-1138, 2006.
- Montalbano**, L., Lewis, S.R., and Read, P.L. Interannual variability of martian dust storms in assimilation of several years of Mars global surveyor observations. *Adv. Space Res* 36, 2146-2155, 2005.

- Morel, L., Witasse, O., Warnant, R., Cerisier, J.-C. Blelly, P.-L., Lilensten, J. Diagnostic of the dayside ionosphere of Mars using the total electron content measurement by the NEIGE/Netlander experiment: An assessment study. *Planet. Space Sci.* 52 (7), 603–611, 2004.
- Morgan, D.D., Witasse, O., Nielsen, E., Gurnett, D.A., Duru, F., Kirchner, D.L. The processing of electron density profiles from the Mars Express MARSIS topside sounder, *Radio Sci* 48, 3, 197-207, 2013.
- Nagy, A.F., Winterhalter, D., Sauer, K., Cravens, T.E., Brecht, S., Mazelle, C., Crider, D., Kallio, E., Zakharov, A., Dubinin, E., Verigin, M., Kotova, G., Axford, W.I., Bertucci, C., Trotignon, J.G. The plasma environment of Mars, *Space Sciences Series of ISSI* 18, 33-114, 2004.
- Nakamura, S. Satellite monitoring of auroral oval on the Earth in relation to solar winds, *Progress in electromagnetics research symposium*, Suzhou, China, 2011.
- Ness, N.F. The Magnetic Fields of Mercury, Mars and Moon, *Ann. Rev. Earth Planetary Sci* 7, 248-288, 1979.
- Ness, N.F., Acuña, M.H., Connerney, J.E.P., Kliore, A.J., Breus, T.K., Krymskii, A.M., Cloutier, P., Bauer, S.J. Effects of magnetic anomalies discovered at Mars on the structure of the martian ionosphere and solar wind interactions as follows from radio-occultation experiments, *J. Geophys. Res* 105, 2000.
- Neukum, G., and Wise, D.U. Mars- A standard crater curve and possible new time scale, *Science* 194, 1381-1387, 1976.
- Neukum, G., and Hiller, K. Martian ages, *J. Geophys. Res* 86, 3097-3121, 1981.
- Neumann, G.A. Crustal structure of Mars from gravity and topography, *J. Geophys. Res* 109, E8, 2004.
- Newman, C.E., Lewis, S.R., and Read, P.L. Modeling the martian dust cycle 1. Representation of dust transport processes, *J. Geophys. Res* 107, 5123, 2002.
- Odaka, M., Taichi, K., Koichiro, S., Kensuke, N., Yoshiyuki, O.T., Masaki, I., Yoshiyuki, H. A formulation of non-hydrostatic model for moist convection in the martian atmosphere, *Proc. Of the 38th ISAS Lunar and Planetary Symposium*, 173-175, 2005.
- Opgenoorth, H.J., Andrews, D.J., Fränz, M., Lester, M., Edberg, N.J.T., Morgan, D.D., Duru, F., Witasse, O., Williams, A.O. Mars ionospheric response to solar wind variability, *J. Geophys. Res* 118, 10, 6558-6587, 2013.

- Picardi, G., Biccardi, D., Seu, R., Plaut, J., Johnson, W.T.K., Jordan, R.L., Safaeinili, A., Gurnett, D.A., Hueff, R., Orosei, R., Bombaci, O., Calabrese, D., Zampolini, E.** Mars Express: A European mission to the red planet, MARSIS: Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding. European Space Agency Publication Division. SP-1240, 51-70, Noordwijk, Netherlands, 2004.
- Purucker, M., Ravat, D., Frey, H., Voorhies, C., Sabaka, T., Acuña, M.H.** An Altitude-normalized Magnetic Field Map of Mars and Its Interpretation, *Geophysical Research Letters* 27, 2449-2452, 2000.
- Qu, J.J., Yan, M., Dong, G., Zhang, H., Zu, R., Tuo, W., Zhao, A., Xiao, Z., Li, F., Yang, B.** Wind tunnel simulation experiment and investigation on the electrification of sandstorms, *Sci. China, Ser D* 47, 529-539, 2004.
- Renno, N.O., Wong, A.-S., Atreya, S.K., de Pater, I., and Ross-Serote, M.** Electrical discharges and broadband radio emission by martian dust devils and dust storms, *Geophys. Res. Lett* 30 (22), 2140, 2003.
- Ramírez-Nicolás, M., Usero, D., and Vázquez, L.** Numerical studies of charged particles in a magnetic field: Mars application, *Cent. Eur. J. Phys* 12, 521-531, 2014.
- Ramírez-Nicolás, M., Usero, D., Velasco, M.P., and Vázquez, L.** Numerical study of a charged particle in a general magnetic field, *International Journal of Pure and Applied Mathematics* (enviado), 2015a.
- Ramírez-Nicolás, M., Sánchez-Cano, B., Witasse, O., Brelvi, P.-L.** The effect of the induced magnetic field on the electron density vertical profile of the Mars' ionosphere: a Mars Express MARSIS radar data analysis and interpretation, *Planet Space Sci* (en revisión), 2015b.
- Ramírez-Nicolás, M., Herraiz, M., Vázquez, L.** Electric field analysis from a numerical scheme on Mars, (en preparación).
- Renno, N.O., Abreu, V.J., Koch, J., Smith, P.H., Hartogensis, O.K., De Bruin, H.A.R., Burose, D., Delory, G.T., Farrell, W.M., Watts, C.J., Garatuza, J., Parker, M., Carswell, A.** MATADOR 2002: A pilot field experiment on convective plumes and dust devils, *J. Geophys. Res* 109, E07001, 2004.
- Renno, N.O., and Kok, F.** Electric lifting of lunar dust. NESC lunar dust workshop, 2007,
- Riedler, W., Möhlmann, D., Oraevsky, V.N., Schwingenschuh, K., Yeroshenko,**

- Y.E., Rustenbach, J., Aydogar, O.E., Berghofer, G., Lichtenegger, H., Delva, M., Schelch, G., Pirsch, K., Fremuth, G., Steller, M., Arnold, H., Raditsch, T., Auster, U., Fornacon, K.-H., Schenk, H.J., Michaelis, H., Motschmann, U., Roatsch, T., Sauer, K., Schröter, R., Kurths, J., Lenners, D., Linthe, J., Kobzev, V., Styashkin, V., Achache, J., Slavin, J., Luhmann, J.G., Russell, C.T. Magnetic field near Mars: First results of the Phobos mission, *Nature* 341, 604-607, 1989.
- Ruff**, S.W., Farmer, J.D., Calvin, W.M., Herkenhoff, K.E., Johnson, J.R., Morris, R.V., Rice, M.S., Arvidson, R.E., Bell III, J.F., Christensen, P.R., Squyres, S.W. Characteristics, distribution, origin, and significance of opaline silica observed by the Spirit rover in Gusev crater, Mars, *J. Geophys. Res* 116, E00F23, 2011.
- Russell**, C.T. The Magnetic Field of Mars: Mars 3 Evidence Re-examined, *Geophys. Res. Lett* 5, 81-84, 1978a.
- Russell**, C.T. The Magnetic Field of Mars: Mars 3 Evidence Re-examined, *Geophys. Res. Lett* 5, 81-84, 1978b.
- Russell**, C.T., and Zhang, T.-L. Unusually distant bow shock encounters at Venus, *Geophys. Res. Lett* 19, 8, 833-836, 1992.
- Sadovskii**, A., and Skalsky, A. Coupling of earth's magnetosphere, solar wind and lunar plasma environment, *Adv. Space. Res* 54, 2017-2020, 2014.
- Sánchez-Cano**, B., Witasse, O., Herraiz, M., Radicella, S.M., Bauer, J., Bletty, P.-L., Rodríguez-Caderot, G. Retrieval of ionospheric profiles from the Mars Express MARSIS experiment data and comparison with radio occultation data. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data System* 1, 1, 77-84, 2012.
- Sánchez-Cano**, B., Radicella, S.M., Herraiz, M., Witasse, O., Rodríguez-Caderot, G. NeMars: An empirical model of the martian ionosphere based on Mars Express MARSIS data, *Icarus* 255, 1, 236-247, 2013.
- Schiaparelli**, G. La vita sul pianeta Marte, extracto del fascículo N.º 11 - Año IV de la revista *Naturaleza y Arte*, cap. I, 1985.
- Schmitz**, D.R., and Cain, J.C. Geomagnetic spherical harmonic analysis, 1, *Techniques, J. Geophys. Res* 88, 1222-1228, 1983.
- Schmidt**, D.R., Schmidt, R.A., and Dent, J.D. Electrostatic force on saltating sand, *J. Geophys. Res* 103, 8997-9001, 1998.

- Schubert, G., Solomon, S.C., Turcotte, D.L., Drake, M.J., Sleep, N.H. Origin and thermal evolution of Mars. In Kieffer, H.H., Jakowsky, B.M., Snyder, C.W., Matthews, M.S. (eds.), Mars. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, Tucson, 1992.
- Schubert, G., Russell, C.T., Moore, W.B. Geophysics: Timing of the martian dynamo, *Nature* 408, 625-750, 2000.
- Scott, D., and Carr, M. Geological map of Mars, U.S. Geol. Surv. Misc. Invest. Map I-803, Reston, Virginia, 1978.
- Shinagawa, H., and Cravens, T.E. A one-dimensional multispecies magnetohydrodynamic model of the dayside ionosphere of Mars, *J. Geophys. Res* 94, 1989.
- Shinagawa, H. The ionospheric effects of a weak intrinsic magnetic field, *J. Geophys. Res* 97, 1992.
- Shinagawa, H. A two-dimensional model of the Venus ionosphere: 1. Unmagnetized ionosphere, *J. Geophys. Res* 101 (A12), 26911-26919, 1996.
- Shinagawa, H. The ionospheres of Venus and Mars, *Adv. Space Res* 33, 1924-1931, 2004.
- Slavin, J.A., Schwingenschuh, K., Riedler, W., and Yeroshenko, Y. The Solar Wind Interaction With Mars: Mariner 4, Mars 2, Mars 3, Mars 5 and Phobos 2 Observations of Bow Shock Position and Shape, *J. Geophys. Res* 96, 11235-11241, 1991.
- Smith, D.E., Zuber, M.T., Frey, H.V., Garvin, J.B., Head, J.W., Muhleman, D.O., Pettengill, G.H., Phillips, R.J., Solomon, S.C., Zwally, H.J., Banerdt, W.B., Duxbury, T.C., Golombek, M.P., Lemoine, F.G., Neumann, G.A., Rowlands, D.D., Aharonson, O., Ford, P.G., Ivanov, A.B., Johnson, C.L., McGovern, P.J., Abshire, J.B., Afzal, R.S., Sun, X. Mars orbiter laser altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars, *J. Geophys. Res* 106, 23689-23722, 2001.
- Smith, M.D. Interannual variability in TES atmospheric observations of Mars during 1999-2003. *Icarus*, 167, 148-165, 2004.
- Spiga, A., Faure, J., Madeleine, J.-B., Mänttänen, A., and Forget, F. Rocket dust storms and detached dust layers in the martian atmosphere, *J. Geophys. Res* 118, 4, 746-767, 2013.

- Spreiter, J.R., and Stahara, S.S. Computer modelling of the solar wind interaction with Venus and Mars, *Venus and Mars: Atmospheres, Ionospheres, and solar wind interactions*, Geophys. Monograph 66, 345, 1992.
- Stevenson, D.J. Mars' core and magnetism, *Nature* 412, 214-219, 2001.
- Stow, C.D. Dust and sand storm electrification, *Weather* 24, 134-137, 1969.
- Störmer, C. Sur les trajectoires des corpuscles electriques, *Arch. Sci. Phys. Nat.* 24, 5-18., *ibid* 113-158., *ibid* 221-247, 1907.
- Störmer, C. The polar aurora, Oxford University Press, London/New York, M1955.
- Störmer, C. Periodische elektronebahnen in felde eines elementarmagneten und ihre anwendung auf brüches modellversuche und auf elementarwellen des erdmagnetisms, *Zs. Astrophys* 1, 237-274, 1931.
- Tanaka, K.L., Skinner, Jr, J.A., Dohm., J.M., Irwin, R.P III., Kolb, E.J., Fortezzo, C.M., Platz, T., Michael, G.G., Hare, T.M. Geologic map of Mars, USGS, 2014.
- Thomas, P., and Gierasch, P.J. Dust devils on Mars, *Science* 230, 175-177, 1985.
- Trotignon, J.G., Grard, R., Skalsky, A. Position and shape of the martian bow shock: the Phobos 2 plasma wave system observations, *Planet. Space Sci* 41, 189-198, 1993.
- Vallée, J.P. Observations of the magnetic fields inside and outside the Solar system: From meteorites (~ 10 attoparsecs), asteroids, plantes, stars, pulsars, masers, to protostellar cloudlets (< 1 parsec), *Fundamentals of cosmis physics* 19, 319-422, 1998.
- Van Hoolst, T. And Jacobs, C. Mercury's tides and interior structure, *J. Geophys. Res* 108, 2003.
- Van Allen, J.A., Ludwig, G.H., Ray, E.C., McIlwain, C.E. Observation of high intensity radiation by satellites 1958 Alpha and Gamma, *Jet Propuls* 28, 588-592, 1958.
- Vázquez, L., and Jiménez, S. Motion of a charge in a magnetic dipole field I. Pinlev, Analysis and a conservative numerical scheme, *Appl. Math. Comput* 25, 207-217, 1988.
- Vázquez, L. La gran aventura de la exploración de Marte, *Real Academia de Ciencias Exactas Fís Nat* 102, 273-283, 2008.
- Vennerstrom, S. Magnetic storms on Mars, *Icarus* 215, 234-241, 2011.

- Verigin, M.I., Shutte, N.M., Galeev, A.A., Gringauz, K.I., Kotova, G.A., Remizov, A. P., Rosenbauer, H., Hemmerich, P., Livi, S., Richter, A.K. Ions of Planetary Origin in martian Magnetosphere, *Planetary Space Sci* 39 (1-2), 131-137, 1991.
- Vignes, D., Mazelle, C., Rme, H., Acuña, M.H., Connerney, J.E.P., Lin, R.P., Mitchell, D.L., Cloutier, P., Crider, D.H., Ness, N.F. The solar wind interaction with Mars: locations and shapes of the bow shock on solar wind dynamic pressure according to Phobos TAUS ion spectrometer measurements, *J. Geophys. Res* 98 (A2), 1303-1309, 2000.
- Volland, H. Atmospheric electrodynamics, Springer, New York, 1984.
- Voorhies, C.V., Sabaka, T.J., and Purucker, M. On Magnetic Spectra of Earth and Mars, *J. Geophys. Res* 107 (E6), 2002.
- Williams, J.P., and Nimmo, F. Thermal evolution of the martian core: Implications for an early dynamo, *Geology* 32, 97-100, 2004.
- Witasse, O. Modélisation des ionosphères planétaires et de leur rayonnement: la Terre et Mars. PhD Thesis, Laboratoire de Planétologie de Grenoble, 2000.
- Witasse, O., Dutuit, O., Lilensten, J., Thissen, R., Zabka, J., Acaraz, C., Blelly, P.-L., Bougher, S.W., Engel, S., Andersen, L.H., Seiersen, K. Prediction of a CO₂⁺ layer in the atmosphere of Mars, *Geophys. Res. Lett* 29 (8), 12-63, 2002.
- Witasse, O., Dutuit, O., Lilensten, J., Thissen, R., Zabka, J., Acaraz, C., Blelly, P.-L., Bougher, S.W., Engel, S., Andersen, L.H., Seiersen, K. Correction to Prediction of a CO₂⁺ layer in the atmosphere of Mars, *Geophys. Res. Lett* 30, 7, 2003.
- Withers, P., Fallows, K., Girazian, Z., Matta, M., Häusler, B., Hinson, D., Tyler, L., Morgan, D., Pätzold, M., Peter, K., Tellmann, S., Peralta, J., Witasse, O. A clear view of the multifaceted dayside ionosphere of Mars, *Geophys. Res. Lett* 39, 18, 2012.
- Watters, T. R., McGovern, P.J., and Rossman, P.I III. Hemispheres Apart: The crustal dichotomy on Mars, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci* 35, 621-652, 2007.
- Zhai, Y., Cummer, S.A., and Farrell, W.M. Quasi-electrostatic field analysis and simulation of martian and terrestrial dust devils, *J. Geophys. Res* 111 (E6), 2006.
- Zhang, M.H.G., and Luhmann, J.G. Comparisons of peak ionosphere pressures

at Mars and Venus with incident solar wind dynamic pressure, J. Geophys. Res 97, 1992.

Zheng, X.J., Huang, N., and Zhou, Y.-H. Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement, J. Geophys. Res 108 (10), 4322, 2003.

LISTA DE PÁGINAS WEB

<http://www.esa.int/esl>

http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/2005_dust_devil.html

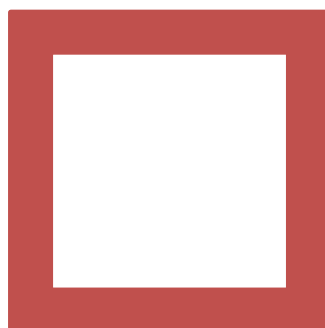
<http://www.sprg.ssl.berkeley.edu/~brain/crustalidl.html>

<http://www.rsd.esa.int/psa>

[http://www. Pancam.astro.cornell.edu](http://www.Pancam.astro.cornell.edu)

<http://www.NASA/JPL-Caltech/UA>

ANEXOS



ANEXO I. Misiones a Marte

Listado de las misiones a Marte entre los años 1960 y 2001.

Tabla AI- 1. Relación de las misiones a Marte llevadas a cabo por diferentes países entre los años 1960 y 2001.

Misión	País	Lanzamiento	Término	Objetivo	Resultado
Marsnik 1960A		10/10/1960	10/10/1960	Vuelo cercano	Fracaso
Mars 1960B		14/10/1960	14/10/1960	Vuelo cercano	Fracaso
Sputnik 22		24/10/1962	24/10/1962	Vuelo cercano	Fracaso
Mars 1		01/11/1962	21/03/1963	Vuelo cercano	Fracaso
Sputnik 24		04/11/1962	19/01/1963	Lander	Fracaso
Zond 1964A		04/06/1964	04/06/1964	Vuelo cercano	Fracaso
Mariner 3		05/11/1964	05/11/1964	Vuelo cercano	Fracaso
Mariner 4		28/11/1964	21/12/1967	Vuelo cercano	Éxito
Zond 2		30/11/1964	05/1965	Vuelo cercano	Fracaso
Mariner 6		01/01/1969	08/1969	Vuelo cercano	Éxito
Mariner7		27/03/1969	08/1969	Vuelo cercano	Éxito
Mars 1969A		27/03/1969	27/03/1969	Orbitador	Fracaso
Mars 1969B		02/04/1969	02/04/1969	Orbitador	Fracaso
Mariner 8		08/05/1971	08/05/1971	Orbitador	Fracaso
Cosmos 419		10/05/1971	12/05/1971	Orbitador	Fracaso
Mariner 9		30/05/1971	27/10/1972	Orbitador	Éxito
Mars 2		19/05/1971	22/08/1972	Orbitador/ Rover	Éxito
Mars 3		28/05/1971	22/08/1972	Orbitador/ Rover	Éxito
Mars 4		21/07/1973	10/02/1974	Orbitador	Fracaso

Misión	País	Lanzamiento	Término	Objetivo	Resultado
Mars 5		25/07/1973	21/02/1974	Orbitador	Éxito
Mars 6		15/08/1973	12/03/1974	Lander	Éxito
Mars 7		09/08/1973	09/03/1974	Lander	Fracaso
Viking 1		20/08/1975	17/08/1980	Orbitador/ Lander	Éxito
Viking 2		09/09/1975	25/07/1978	Orbitador/ Lander	Éxito
Phobos 1		07/07/1988	02/09/1988	Orbitador/ Lander	Fracaso
Phobos 2		12/07/1988	27/03/1989	Orbitador	Éxito
Mars Observer		25/09/1992	21/08/1993	Orbitador	Fracaso
Mars Global Surveyor		07/11/1996	05/11/2006	Orbitador	Éxito
Mars 96		16/11/1996	17/11/1996	Orbitador/ Lander	Fracaso
Mars Pathfinder		04/12/1996	27/09/1997	Lander / Rover	Éxito
Nozomi		03/07/1998	09/12/2003	Orbitador	Fracaso
Mars Climate Orbiter		11/12/1998	23/09/1999	Orbitador	Fracaso
Mars Polar Lander		03/01/1999	03/12/1999	Lander	Fracaso
Mars Odyssey		07/04/2001	Operativa	Orbitador	Éxito

ANEXO II. Método Runge-Kutta

El método de Runge-Kutta de cuarto orden, es la forma más empleada para obtener las soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales.

En particular, resolver una ecuación diferencial de segundo orden del tipo, $\frac{d^2x}{dt^2} = f(x, v, t)$ a partir de este método, equivale a resolver un sistema de dos ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= v \\ \frac{dv}{dt} &= f(x, v, t)\end{aligned}\tag{AII.1}$$

La solución se alcanzará de forma iterativa a partir de las soluciones iniciales

$$x(t_0) = x_0, \left(\frac{dx}{dt}\right)_{t_0} = v_0.$$

Considerando dichas expresiones, la solución de la ecuación (AII.1) se obtiene utilizando:

$$\begin{aligned}k1 &= hv \\ k2 &= h\left(v + \frac{l1}{2}\right) \\ k3 &= h\left(v + \frac{l2}{2}\right) \\ k4 &= h(v + l3)\end{aligned}\tag{AII.2}$$

donde los valores de l se calculan a partir de

$$\begin{aligned}
 l1 &= h \cdot f(x, v, t) \\
 l2 &= h \cdot f\left(x + \frac{k1}{2}, v + \frac{l1}{2}, t + \frac{h}{2}\right) \\
 l3 &= h \cdot f\left(x + \frac{k2}{2}, v + \frac{l2}{2}, t + \frac{h}{2}\right) \\
 l4 &= h \cdot f(x + k3, v + l3, t + h)
 \end{aligned}
 \tag{AII.3}$$

Por medio de las ecuaciones (AII.2, AII.3) se obtienen las soluciones del sistema a partir de

$$\begin{aligned}
 x(t+h) &= x(t) + \frac{1}{6}(k1 + 2k2 + 2k3 + k4) \\
 v(t+h) &= v(t) + \frac{1}{6}(l1 + 2l2 + 2l3 + l4)
 \end{aligned}
 \tag{AII.4}$$

En el caso particular planteado en esta Tesis, las ecuaciones pasan a escribirse para las dos poblaciones de granos de polvo del siguiente modo:

$$vLl = \frac{2\alpha_L(-1 + \exp(t(n-1) \cdot w_L))}{b_L(1 - \exp(t(n-1) \cdot w_L)) + w_L(1 + \exp(t(n-1) \cdot w_L))}
 \tag{AII.5}$$

$$vSl = \frac{2\alpha_S(-1 + \exp(t(n-1) \cdot w_S))}{b_S(1 - \exp(t(n-1) \cdot w_S)) + w_S(1 + \exp(t(n-1) \cdot w_S))}
 \tag{AII.6}$$

$$dvLl = \frac{4\alpha_L w_L^2 \exp(w_L \cdot t(n-1))}{\left(b_L(-\exp(w_L \cdot t(n-1))) + b_L + w_L \cdot \exp(w_L \cdot t(n-1)) + w_L\right)^2}
 \tag{AII.7}$$

$$dvSl = \frac{4\alpha_S w_S^2 \exp(w_S \cdot t(n-1))}{\left(b_S(-\exp(w_S \cdot t(n-1))) + b_S + w_S \cdot \exp(w_S \cdot t(n-1)) + w_S\right)^2}
 \tag{AII.8}$$

donde

$$kl = h \cdot E2(n-l) \quad \text{AII.9}$$

$$ll = h \left(-\frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot E2(n-l) - Y(vLl - vSl)^2 - \frac{n_L}{\varepsilon_0} Q_L(dvLl - dvSl) \right) \quad \text{AII.10}$$

el segundo término se calcula a partir de

$$vL2 = \frac{2a_L \left(-l + \exp\left(\left(t(n-l) + h/2\right) \cdot w_L\right) \right)}{b_L \left(1 - \exp\left(\left(t(n-l) + h/2\right) \cdot w_L\right) \right) + w_L \left(1 + \exp\left(\left(t(n-l) + h/2\right) \cdot w_L\right) \right)} \quad \text{AII.11}$$

$$vS2 = \frac{2a_S \left(-l + \exp\left(\left(t(n-l) + h/2\right) \cdot w_S\right) \right)}{b_S \left(1 - \exp\left(\left(t(n-l) + h/2\right) \cdot w_S\right) \right) + w_S \left(1 + \exp\left(\left(t(n-l) + h/2\right) \cdot w_S\right) \right)} \quad \text{AII.12}$$

$$dvL2 = \frac{4a_L w_L^2 \exp\left(w_L \cdot \left(t(n-l) + h/2\right)\right)}{\left(b_L \left(-\exp\left(w_L \cdot \left(t(n-l) + h/2\right)\right) + b_L + w_L \cdot \exp\left(w_L \cdot \left(t(n-l) + h/2\right)\right) + w_L\right)\right)^2} \quad \text{AII.13}$$

$$dvS2 = \frac{4a_S w_S^2 \exp\left(w_S \cdot \left(t(n-l) + h/2\right)\right)}{\left(b_S \left(-\exp\left(w_S \cdot \left(t(n-l) + h/2\right)\right) + b_S + w_S \cdot \exp\left(w_S \cdot \left(t(n-l) + h/2\right)\right) + w_S\right)\right)^2} \quad \text{AII.14}$$

donde

$$k2 = h \cdot \left(E2(n-l) + \frac{ll}{2} \right) \quad \text{AII.15}$$

$$l2 = h \left(-\frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot \left(E2(n-l) + \frac{ll}{2} \right) - Y(vL2 - vS2)^2 - \frac{n_L}{\varepsilon_0} Q_L(dvL2 - dvS2) \right) \quad \text{AII.16}$$

el tercer término

$$vL3 = \frac{2\alpha_L \left(-1 + \exp \left(\left(t(n-l) + h/2 \right) \cdot w_L \right) \right)}{b_L \left(1 - \exp \left(\left(t(n-l) + h/2 \right) \cdot w_L \right) \right) + w_L \left(1 + \exp \left(\left(t(n-l) + h/2 \right) \cdot w_L \right) \right)} \quad \text{AII.17}$$

$$vS3 = \frac{2\alpha_S \left(-1 + \exp \left(\left(t(n-l) + h/2 \right) \cdot w_S \right) \right)}{b_S \left(1 - \exp \left(\left(t(n-l) + h/2 \right) \cdot w_S \right) \right) + w_S \left(1 + \exp \left(\left(t(n-l) + h/2 \right) \cdot w_S \right) \right)} \quad \text{AII.18}$$

$$dvL3 = \frac{4\alpha_L w_L^2 \exp \left(w_L \cdot \left(t(n-l) + h/2 \right) \right)}{\left(b_L \left(-\exp \left(w_L \cdot \left(t(n-l) + h/2 \right) \right) + b_L + w_L \cdot \exp \left(w_L \cdot \left(t(n-l) + h/2 \right) \right) + w_L \right) \right)^2} \quad \text{AII.19}$$

$$dvS3 = \frac{4\alpha_S w_S^2 \exp \left(w_S \cdot \left(t(n-l) + h/2 \right) \right)}{\left(b_S \left(-\exp \left(w_S \cdot \left(t(n-l) + h/2 \right) \right) + b_S + w_S \cdot \exp \left(w_S \cdot \left(t(n-l) + h/2 \right) \right) + w_S \right) \right)^2} \quad \text{AII.20}$$

donde

$$k3 = h \cdot \left(E2(n-l) + \frac{l2}{2} \right) \quad \text{AII.21}$$

$$l3 = h \left(-\frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot \left(E2(n-l) + \frac{l2}{2} \right) - Y \left(vL3 - vS3 \right)^2 - \frac{n_L}{\varepsilon_0} Q_L \left(dvL3 - dvS3 \right) \right) \quad \text{AII.22}$$

Por último, el cuarto término viene dado por

$$vL4 = \frac{2\alpha_L \left(-1 + \exp \left(\left(t(n-l) + h \right) \cdot w_L \right) \right)}{b_L \left(1 - \exp \left(\left(t(n-l) + h \right) \cdot w_L \right) \right) + w_L \left(1 + \exp \left(\left(t(n-l) + h \right) \cdot w_L \right) \right)} \quad \text{AII.23}$$

$$vS4 = \frac{2\alpha_S \left(-1 + \exp \left(\left(t(n-l) + h \right) \cdot w_S \right) \right)}{b_S \left(1 - \exp \left(\left(t(n-l) + h \right) \cdot w_S \right) \right) + w_S \left(1 + \exp \left(\left(t(n-l) + h \right) \cdot w_S \right) \right)} \quad \text{AII.24}$$

$$dvL4 = \frac{4a_L w_L^2 \exp\left(w_L \cdot \left(t(n-l) + h\right)\right)}{\left(b_L \left(-\exp\left(w_L \cdot \left(t(n-l) + h\right)\right) + b_L + w_L \cdot \exp\left(w_L \cdot \left(t(n-l) + h\right)\right) + w_L\right)\right)^2} \quad \text{AII.25}$$

$$dvS4 = \frac{4a_S w_S^2 \exp\left(w_S \cdot \left(t(n-l) + h\right)\right)}{\left(b_S \left(-\exp\left(w_S \cdot \left(t(n-l) + h\right)\right) + b_S + w_S \cdot \exp\left(w_S \cdot \left(t(n-l) + h\right)\right) + w_S\right)\right)^2} \quad \text{AII.26}$$

donde

$$k4 = h \cdot \left(E2(n-l) + l3\right) \quad \text{AII.27}$$

$$l4 = h \left(-\frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot \left(E2(n-l) + l3\right) - Y \left(vL4 - vS4\right)^2 - \frac{n_L}{\varepsilon_0} Q_L \left(dvL4 - dvS4\right) \right) \quad \text{AII.28}$$

Para todas las expresiones mostradas en dicho anexo, $Y = \frac{n_L n_S \pi \cdot r_L^2 \cdot \Delta q}{\varepsilon_0}$.

Empleando todas estas ecuaciones, las expresiones AII.4 pasan a escribirse como:

$$EI(n) = EI(n-l) + \frac{l}{6} (kl + 2k2 + 2k3 + k4) \quad \text{AII.29}$$

$$E2(n) = E2(n-l) + \frac{l}{6} (ll + 2l2 + 2l3 + l4) \quad \text{AII.30}$$

ANEXO III. Parámetros característicos órbitas: 9316, 3151 y 6788.

Resumen de los parámetros característicos de cada una de las órbitas de la misión Mars Express estudiadas a lo largo de esta Tesis.

Tabla AIII- 1. Información, de los parámetros representativos, relativa a la órbita 2018 de la misión Mars Express.

HORA (hh:mm:ss)	z (km)	Int (ms)	Num	T (ms)	B (nT)	Lat (°)	Lon (°)	SZA (°)
19:13:12.443	607.21	2-6	4	4/4	35.73	-34.00	194.44	47.57
19:13:19.986	599.92	2-6	5	4/5	44.66	-33.58	194.45	47.63
19:13:27.529	592.69	1-5	5	4/5	44.66	-33.15	194.46	47.70
19:13:35.072	585.54	1-5	5	4/5	44.66	-32.72	194.46	47.77
19:13:42.616	578.45	1-5	5	4/5	44.66	-32.29	194.47	47.84
19:13:50.159	571.44	1-5	5	4/5	44.66	-31.86	194.47	47.92
19:13:57.702	564.50	1-5	5	4/5	44.66	-31.43	194.48	47.99
19:14:05.245	557.63	1-6	7	5/7	50.32	-31.00	194.48	48.08
19:14:12.788	550.83	1-6	7	5/7	50.04	-30.56	194.49	48.16
19:14:20.332	544.11	1-6	7	5/7	50.04	-30.12	194.49	48.25
19:14:27.875	537.47	1-6	7	5/7	50.04	-29.68	194.50	48.34
19:14:35.418	530.90	1-6	7	5/7	50.04	-29.24	194.50	48.44
19:14:42.961	524.41	1-5	5	4/5	44.66	-28.80	194.50	48.53
19:14:50.504	517.99	1-6	7	5/7	50.04	-28.36	194.51	48.63
19:14:58.048	511.66	1-5	5	4/5	44.66	-27.91	194.51	48.74
19:15:05.591	505.40	2-5	4	3/4	47.64	-27.47	194.51	48.85
19:15:13.134	499.22	1-5	5	4/5	44.66	-27.02	194.52	48.96
19:15:20.677	493.12	1-5	5	4/5	44.66	-26.57	194.52	49.07
19:15:28.220	487.10	1-5	5	4/5	44.66	-26.12	194.52	49.19
19:15:35.764	481.16	1-6	7	5/7	50.04	-25.67	194.52	49.31
19:15:43.307	475.30	1-5	6	4/6	53.65	-25.22	194.53	49.43
19:15:50.850	469.53	1-5	6	4/6	53.65	-24.76	194.53	49.56
19:15:58.393	463.84	1-5	6	4/6	53.65	-24.31	194.53	49.63
19:16:05.936	458.22	1-4	5	3/5	59.55	-23.85	194.53	49.83
19:16:13.480	452.71	1-5	7	4/7	62.57	-23.39	194.53	49.96
19:16:21.023	447.27	1-6	9	5/9	64.38	-22.93	194.54	50.10
19:16:28.566	441.91	1-6	10	5/10	71.46	-22.47	194.54	50.25
19:16:36.109	436.65	1-5.25	9	4.25/9	75.70	-22.01	194.54	50.39
19:16:43.652	431.47	0.75-5.25	10	4.50/10	79.40	-21.55	194.54	50.54
19:16:51.196	426.37	0.75-6	12	5.25/12	81.76	-21.08	194.54	50.70
19:16:58.739	421.37	0.75-6	13	5.25/13	88.44	-20.62	194.54	50.85
19:17:06.282	416.45	1-4	8	3/8	95.28	-20.15	194.54	51.01

HORA (hh:mm:ss)	z (km)	Int (ms)	Num	T (ms)	B (nT)	Lat (°)	Lon (°)	SZA (°)
19:17:13.825	411.63	1-5	11	4/11	98.16	-19.68	194.54	51.18
19:17:21.369	406.89	1-5	12	4/12	107.30	-19.21	194.54	51.34
19:17:28.912	402.24	1-5	13	4/13	116.01	-18.74	194.54	51.51
19:17:36.455	397.69	2-6	13	4/13	116.01	-18.27	194.54	51.69
19:17:43.998	393.22	2-6	14	4/14	124.93	-17.80	194.54	51.86
19:17:51.541	388.85	1-6	18	5/18	128.99	-17.33	194.54	52.04
19:17:59.085	384.57	1-5	15	4/15	134.32	-16.85	194.55	52.22
19:18:06.628	380.38	1-4	12	3/12	142.92	-16.38	194.55	52.41
19:18:14.171	376.29	1-5	17	4/17	152.04	-15.90	194.55	52.60
19:18:21.714	372.29	0.75-6	23	5.25/23	156.71	-15.42	194.55	52.79
19:18:29.257	368.39	2-6	18	4/18	160.95	-14.94	194.54	52.98
19:18:36.801	364.58	2-5	14	3/14	166.96	-14.46	194.54	53.18
19:18:44.344	360.86	1-6	24	5/24	171.78	-13.98	194.54	53.38
19:18:51.887	357.25	1-5	19	4/19	169.34	-13.50	194.54	53.58
19:18:59.430	353.72	1-5	19	4/19	169.34	-13.02	194.54	53.79
19:19:06.973	350.30	1.25-5	18	3.75/18	171.78	-12.53	194.54	54.00
19:19:14.517	346.97	1.25-5	18	3.75/18	171.78	-12.05	194.54	54.21
19:19:22.060	343.75	1-6	23	5/23	164.65	-11.56	194.54	54.42
19:19:29.603	340.61	2-5.25	15	3.25/15	165.42	-11.08	194.54	54.64
19:19:37.146	337.58	0.75-6	23	5.25/23	156.71	-10.59	194.54	54.86
19:19:44.689	334.65	1-6	21	5/21	150.13	-10.10	194.54	55.08
19:19:52.233	331.82	1-6	19	5/19	135.86	-9.61	194.54	55.31
19:19:59.776	329.08	1-6	18	5/18	128.99	-9.12	194.54	55.54
19:20:07.319	326.45	2-5	10	3/10	119.10	-8.63	194.54	55.77
19:20:14.862	323.92	1-6	16	5/16	114.15	-8.14	194.54	56.00
19:20:22.405	321.49	1-6	15	5/15	107.30	-7.65	194.53	56.24
19:20:29.949	319.16	1-6	14	5/14	100.08	-7.16	194.53	56.48
19:20:37.492	316.93	1-6	13	5/13	92.81	-6.67	194.53	56.72
19:20:45.035	314.80	1-6	12	5/12	85.89	-6.18	194.53	56.96
19:20:52.578	312.78	1.25-6.25	12	5/12	85.89	-5.68	194.53	57.21
19:21:00.121	310.86	2-6	9	4/9	81.20	-5.19	194.53	57.46
19:21:07.665	309.04	1.25-6	10	4.75/10	75.22	-4.69	194.53	57.71
19:21:15.208	307.32	1-6	10	5/10	71.46	-4.20	194.53	57.96
19:21:22.751	305.71	1-6.25	10	5.25/10	68.06	-3.70	194.53	58.22
19:21:30.294	304.20	1-6	9	5/9	64.38	-3.21	194.53	58.47
19:21:37.837	302.80	1-6	8	5/8	57.17	-2.71	194.52	58.73
19:21:45.381	301.49	1-6	7	5/7	50.04	-2.21	194.52	59.00
19:21:52.924	300.30	1-5	5	4/5	44.66	-1.72	194.52	59.26
19:22:00.467	299.20	1-5	5	4/5	44.66	-1.22	194.52	59.53
19:22:08.010	298.21	0.75-5.25	6	4.50/6	47.64	-0.72	194.52	59.79
19:22:15.553	297.33	0.75-5	5	4.25/5	42.04	-0.22	194.52	60.06
19:22:23.097	296.55	0.75-5	5	4.25/5	42.04	0.27	194.52	60.34
19:22:30.640	295.87	1-5	4	4/4	35.73	0.77	194.52	60.61
19:22:38.183	295.30	1-5	4	4/4	35.73	12.71	194.51	60.89
19:22:45.726	294.84	1-4	3	3/3	35.73	17.70	194.51	61.17

HORA (hh:mm:ss)	z (km)	Int (ms)	Num	T (ms)	B (nT)	Lat (°)	Lon (°)	SAZ (°)
19:22:53.269	294.47	1-4	3	3/3	35.73	22.69	194.51	61.45
19:23:00.813	294.22	1-4	3	3/3	35.73	27.68	194.51	61.73
19:23:08.356	294.07	1-4	3	3/3	35.73	32.67	194.51	62.01
19:23:15.899	294.02	1-4	3	3/3	35.73	37.65	194.51	62.30
19:23:23.442	294.08	1-3	2	2/2	35.73	42.64	194.51	62.58
19:23:30.985	294.24	1-3	2	2/2	35.73	47.63	194.51	62.87
19:23:38.529	294.51	1-3	2	2/2	35.73	52.62	194.51	63.16
19:23:46.072	294.89	1-3	2	2/2	35.73	57.61	194.51	63.45
19:23:53.615	295.37	1-3	2	2/2	35.73	62.59	194.51	63.75
19:24:01.158	295.95	1-5	3	4/3	26.86	67.58	194.50	64.04
19:24:08.701	296.64	1-5	3	4/3	26.86	72.56	194.50	64.34
19:24:16.245	297.43	1-5	3	4/3	26.86	77.54	194.50	64.63
19:24:23.788	298.33	1-5	3	4/3	26.86	82.52	194.50	64.93
19:24:31.331	299.33	1-4	3	3/3	35.73	87.50	194.50	65.23
19:24:38.874	300.44	1-5	4	4/4	35.73	92.47	194.50	65.53
19:24:46.417	301.65	1-5	4	4/4	35.73	97.44	194.50	65.83
19:24:53.961	302.96	1-3	2	2/2	35.73	10.24	194.50	66.14
19:25:01.504	304.38	1-4	3	3/3	35.73	10.74	194.50	66.44
19:25:09.047	305.90	1-5	4	4/4	35.73	11.23	194.50	66.74
19:25:16.590	307.53	1-4.25	4	3.25/4	44.11	11.73	194.50	67.05
19:25:31.677	311.08	1-4	3	3/3	35.73	12.72	194.50	67.66
19:25:39.220	313.02	1-3	2	2/2	35.73	13.21	194.50	67.97
19:25:46.763	315.05	1-3	2	2/2	35.73	13.71	194.50	68.28
19:25:54.306	317.19	1-3	2	2/2	35.73	14.20	194.50	68.59
19:26:16.936	324.21	1-5	3	4/3	26.86	15.68	194.50	69.52
19:26:24.479	326.75	1-4	2	4/2	17.87	16.17	194.50	69.83
19:29:02.886	402.69	2-5	2	3/2	23.82	26.28	194.55	76.44
19:29:10.430	407.34	2-5	2	3/2	23.82	26.75	194.56	76.75
19:29:25.516	416.91	2-5	2	3/2	23.82	27.69	194.57	77.38
19:29:33.059	421.82	2-5	2	3/2	23.82	28.16	194.57	77.69
19:29:40.602	426.83	2-5	2	3/2	23.82	28.62	194.58	78.00
19:29:48.146	431.92	2-5	2	3/2	23.82	29.09	194.58	78.31
19:29:55.689	437.10	2-5	2	3/2	23.82	29.55	194.59	78.63
19:30:03.232	442.37	2-5	2	3/2	23.82	30.01	194.60	78.94
19:30:10.775	447.72	2-5	2	3/2	23.82	30.47	194.60	79.25
19:30:18.318	453.16	2-5	2	3/2	23.82	30.93	194.61	79.56
19:30:25.862	458.69	2-5	2	3/2	23.82	31.39	194.61	79.87
19:30:33.405	464.29	1-5	2	4/2	17.87	31.85	194.62	80.18
19:30:48.491	475.75	1-5	2	4/2	17.87	32.76	194.64	80.79
19:30:56.034	481.61	1-5	2	4/2	17.87	33.21	194.64	81.10
19:31:03.578	487.55	1-4	2	3/2	23.82	33.66	194.65	81.41
19:31:18.664	499.66	1-5	2	4/2	17.87	34.56	194.67	82.02
19:31:26.207	505.83	1-5	2	4/2	17.87	35.01	194.68	82.32
19:31:33.750	512.09	1-5	2	4/2	17.87	35.46	194.69	82.63
19:31:41.294	518.42	1-5	2	4/2	17.87	35.90	194.70	82.93

HORA (hh:mm:ss)	z (km)	Int (ms)	Num	T (ms)	B (nT)	Lat (°)	Lon (°)	SAZ (°)
19:31:48.837	524.83	2-5	2	3/2	23.82	36.34	194.71	83.23
19:31:56.380	531.32	2-5	2	3/2	23.82	36.79	194.72	83.53
19:32:03.923	537.88	2-5	2	3/2	23.82	37.23	194.73	83.83
19:32:11.466	544.52	2-5	2	3/2	23.82	37.66	194.74	84.13
19:32:19.010	551.23	2-5	2	3/2	23.82	38.10	194.75	84.43
19:32:26.553	558.02	2-5	2	3/2	23.82	38.54	194.76	84.73
19:32:34.096	564.88	2-5	2	3/2	23.82	38.97	194.77	85.03
19:32:41.639	571.81	1-5	2	4/2	17.87	39.41	194.78	85.32
19:32:49.182	578.82	1-5	2	4/2	17.87	39.84	194.80	85.62
19:32:56.726	585.90	1-5	2	4/2	17.87	40.27	194.81	85.91
19:33:04.269	593.04	1-5	2	4/2	17.87	40.70	194.82	86.21
19:33:11.812	600.26	1-5	2	4/2	17.87	41.12	194.84	86.50
19:33:19.355	607.55	1-5	2	4/2	17.87	41.55	194.85	86.79

Tabla AIII- 2. Información obtenida a partir de los ionogramas del radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express para la órbita 9316.

Perfil	Hor (hh:mm:ss.sss)	z (km)	Int	Num	T	B (nT)	Lat (°)	Lon (°)	SAZ (°)
152	04:56:29	372.51	0	0	0	0	21.39	284.153	88.34
155	04:56:52	365.74	0	0	0	0	19.93	284.153	87.73
158	04:57:14	359.87	0	0	0	0	18.46	284.151	87.13
160	04:57:29	356.46	0	0	0	0	17.47	284.149	86.72
161	04:57:37	354.91	0	0	0	0	16.98	284.147	86.52
162	04:57:44	353.45	0	0	0	0	16.49	284.146	86.32
168	04:58:30	346.90	0	0	0	0	13.52	284.135	85.10
169	04:58:37	346.17	0	0	0	0	13.02	284.133	84.90
170	04:58:45	345.54	0	0	0	0	12.53	284.131	84.70
171	04:58:52	345.01	0	0	0	0	12.03	284.128	84.50
177	04:59:38	344.02	0	0	0	0	9.06	284.112	83.30
178	04:59:45	344.22	0	0	0	0	8.56	284.109	83.10
182	05:00:15	346.04	0	0	0	0	6.58	284.097	82.31
183	05:00:23	346.76	0	0	0	0	6.08	284.093	82.12
184	05:00:30	347.58	0	0	0	0	5.59	284.090	81.92
185	05:00:38	348.50	0	0	0	0	5.09	284.086	81.73
186	05:00:45	349.52	0	0	0	0	4.59	284.083	81.53
188	05:01:01	351.88	0	0	0	0	3.61	284.076	81.14
189	05:01:08	353.21	0	0	0	0	3.11	284.072	80.95
191	05:01:23	356.18	0	0	0	0	2.12	284.065	80.57
193	05:01:38	359.56	0	0	0	0	1.14	284.057	80.19
197	05:02:08	367.53	0	0	0	0	-0.82	284.04	79.44
199	05:02:24	372.12	0	0	0	0	-1.80	284.03	79.08
201	05:02:39	377.11	0	0	0	0	-2.77	284.03	78.71
203	05:02:54	382.48	0	0	0	0	-3.75	284.02	78.35
204	05:03:01	385.32	0	0	0	0	-4.23	284.01	78.17
205	05:03:09	388.25	0	0	0	0	-4.71	284.01	78.00
207	05:03:24	394.41	0	0	0	0	-5.68	284.00	77.64
209	05:03:39	400.95	0	0	0	0	-6.64	283.99	77.30
211	05:03:54	407.88	0	0	0	0	-7.60	283.98	76.95
214	05:04:17	418.97	0	0	0	0	-9.03	283.97	76.45
217	05:04:39	430.91	0	0	0	0	-10.45	283.96	75.95
218	05:04:47	435.07	0	0	0	0	-10.92	283.96	75.79
219	05:04:54	439.33	0	0	0	0	-11.39	283.95	75.63
223	05:05:25	457.25	0	0	0	0	-13.26	283.94	74.99
225	05:05:40	466.74	0	0	0	0	-14.19	283.93	74.68
227	05:05:55	476.59	0	0	0	0	-15.12	283.92	74.38
229	05:06:10	486.78	0	0	0	0	-16.04	283.91	74.08
230	05:06:17	492.00	0	0	0	0	-16.49	283.91	73.93
232	05:06:32	502.70	0	0	0	0	-17.40	283.90	73.64
234	05:06:48	513.74	0	0	0	0	-18.31	283.90	73.36
238	05:07:18	536.80	0	0	0	0	-20.11	283.883	72.80

Tabla AIII- 3. Información obtenida a partir de los ionogramas del radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express para la órbita 3151.

Perfil	Hor (hh:mm:ss.sss)	z (km)	Int	Num	T	B (nT)	Lat (°)	Lon (°)	SZA (°)
125	23:36:38.784	374.89	0.8-6.6	8	5.8/8	49.28	33.10	293.80	43.29
126	23:36:46.327	371.33	0.8-6.6	8	5.8/8	49.28	32.62	293.81	43.33
127	23:36:53.870	367.87	0.8-7.1	9	6.3/9	51.04	32.14	293.82	43.37
129	23:37:08.956	361.24	0.8-7.2	9	6.4/9	50.25	31.17	293.84	43.47
132	23:37:31.586	352.01	0.8-7.4	9	6.6/9	48.72	29.70	293.86	43.64
133	23:37:39.129	349.12	0.7-7.1	9	6.4/9	50.25	29.22	293.86	43.71
135	23:37:54.216	343.65	0.8-6.7	8	5.9/8	48.45	28.24	293.88	43.86
136	23:38:01.759	341.07	0.8-6.7	8	5.9/8	48.45	27.74	293.88	43.95
137	23:38:09.302	338.58	0.8-6.7	8	5.9/8	48.45	27.25	293.89	44.03
138	23:38:16.845	336.19	0.8-6.5	8	5.7/8	50.15	26.76	293.89	44.12
140	23:38:31.932	331.71	0.8-7.4	9	6.6/9	48.72	25.77	293.90	44.32
141	23:38:39.475	329.62	0.8-7.4	9	6.6/9	48.72	25.28	293.90	44.42
144	23:39:02.104	323.96	0.8-7.3	9	6.5/9	49.47	23.79	293.92	44.76
146	23:39:17.191	320.70	0.8-6.6	8	5.8/8	49.47	22.79	293.92	45.00
148	23:39:32.277	317.84	0.8-7.3	9	6.5/9	50.25	21.80	293.93	45.27
151	23:39:54.907	314.32	0.8-7.2	9	6.4/9	45.37	20.30	293.93	45.69
152	23:40:02.450	313.36	0.9-7.2	8	6.3/8	41.87	19.80	293.94	45.84
156	23:40:32.623	310.53	0.7-6.9	9	6.2/9	56.10	17.80	293.94	46.48
157	23:40:40.166	310.08	0.9-7.1	8	6.2/8	49.47	17.30	293.94	46.65
159	23:40:55.252	309.49	0.8-7.3	9	6.5/9	51.87	16.29	293.94	46.99
160	23:41:02.796	309.35	0.8-7	9	6.2/9	51.87	15.79	293.94	47.17
161	23:41:10.339	309.32	0.7-6.9	9	6.2/9	51.04	15.29	293.94	47.36
164	23:41:32.968	309.84	0.8-7.1	9	6.3/9	52.72	13.79	293.94	47.93
166	23:41:48.055	310.71	0.7-6.8	9	6.1/9	51.87	12.78	293.94	48.33
167	23:41:55.598	311.30	0.8-7	9	6.2/9	50.25	12.28	293.94	48.53
168	23:42:03.141	311.99	0.8-7.2	9	6.4/9	54.97	11.78	293.94	48.74
169	23:42:10.684	312.79	0.7-7.2	10	6.5/10	54.97	11.28	293.94	48.95
170	23:42:18.228	313.69	0.7-7.2	10	6.5/10	59.55	10.78	293.94	49.16
171	23:42:25.771	314.70	0.7-3.7	5	3/5	62.14	10.28	293.94	49.38
172	23:42:33.314	315.81	0.7-3	4	2.3/4	54.14	9.78	293.94	49.59
173	23:42:40.857	317.02	0.7-7.3	10	6.6/10	55.83	9.28	293.94	49.82
174	23:42:48.400	318.33	0.7-3.9	5	3.2/5	51.04	8.78	293.94	50.04
175	23:42:55.944	319.75	0.8-6.4	8	5.6/8	50.15	8.28	293.94	50.27
176	23:43:03.487	321.27	0.8-6.5	8	5.7/8	50.25	7.78	293.93	50.50
177	23:43:11.030	322.89	0.8-7.2	9	6.4/9	50.25	7.28	293.93	50.73
179	23:43:26.116	326.44	0.7-7.4	10	6.7/10	53.33	6.28	293.93	51.20
183	23:43:56.289	334.77	0.7-7.4	10	6.7/10	53.33	4.30	293.92	52.18
184	23:44:03.832	337.10	0.8-7.2	9	6.4/9	50.25	3.80	293.92	52.43
185	23:44:11.376	339.54	0.7-7	9	6.3/9	51.04	3.31	293.92	52.68
186	23:44:18.919	342.08	0.7-7.2	9	6.5/9	49.47	2.82	293.91	52.93
187	23:44:26.462	344.71	0.8-7.3	9	6.5/9	49.47	2.32	293.91	53.19
188	23:44:34.005	347.45	0.8-7.4	9	6.6/9	48.72	1.83	293.91	53.45

Perfil	Hor (hh:mm:ss.sss)	z (km)	Int	Num	T	B (nT)	Lat (°)	Lon (°)	SZA (°)
189	23:44:41.548	350.28	0.8-7.3	9	6.5/9	49.47	1.34	293.91	53.71
192	23:45:04.178	359.37	0.8-6.7	8	5.9/8	48.45	-0.13	293.90	54.50

Tabla AIII- 4. Información obtenida a partir de los ionogramas del radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express para la órbita 6788.

Perfil	Hor (hh:mm:ss.sss)	z (km)	Int	Num	T	B (nT)	Lat (°)	Lon (°)	SZA (°)
160	01:47:28.865	308.01	0.5-6.4	11	5.9/11	66.61	-66.45	200.58	89.65
164	01:47:59.038	309.20	0.7-3.9	5	3.2/5	55.83	-68.42	201.22	87.79
166	01:48:14.125	310.40	0.9-3.9	4	3/4	47.64	-69.40	201.58	86.86
169	01:48:29.211	312.01	1.2-4	3	2.8/3	38.28	-70.38	201.99	85.93
170	01:48:44.297	314.03	1-5.3	5	4.3/5	41.55	-71.36	202.45	85.00
172	01:48:59.384	316.45	0.8-1.9	2	1.1/2	64.96	-72.34	202.95	84.08
174	01:49:14.470	319.27	0.6-4.8	7	4.2/7	59.55	-73.31	203.53	83.15
176	01:49:29.557	322.49	0.5-7.2	13	6.7/13	69.32	-74.28	204.17	82.23
177	01:49:37.100	324.25	0.5-7	14	6.5/14	76.95	-74.76	204.53	81.77
178	01:49:44.643	326.11	0.4-7	15	6.3/15	85.07	-75.24	204.91	81.31
179	01:49:52.186	328.07	0.4-7.1	16	6.7/16	85.32	-75.72	205.31	80.85
181	01:50:07.273	332.29	0.4-7.2	17	6.8/17	89.33	-76.67	206.21	79.93
182	01:50:14.816	334.54	0.4-7.2	17	6.8/17	89.33	-77.15	206.72	79.47
183	01:50:22.359	336.90	0.4-7	16	6.6/16	86.62	-77.62	207.26	79.02
184	01:50:29.902	339.35	0.4-6.9	15	6.5/15	82.46	-78.09	207.85	78.56
187	01:50:52.532	347.29	0.5-7.2	12	6.7/12	64.00	-79.49	209.92	77.20
188	01:51:00.075	350.13	0.6-7.3	11	6.7/11	58.66	-79.96	210.74	76.74
189	01:51:07.618	353.07	0.7-6	8	5.3/8	53.93	-80.42	211.65	76.29
190	01:51:15.162	356.10	0.8-6.8	8	6/8	47.64	-80.87	212.64	75.84
191	01:51:22.705	359.22	0.9-5.7	6	4.8/6	44.66	-81.32	213.73	75.39
194	01:51:45.334	369.17	1.2-2.6	2	1.4/2	29.78	-82.65	217.82	74.04

ANEXO IV. Perfiles densidad electrónica, 3151

Perfiles de densidad electrónica correspondientes a la órbita 3151 obtenidos a partir de los datos del radar MARSIS.

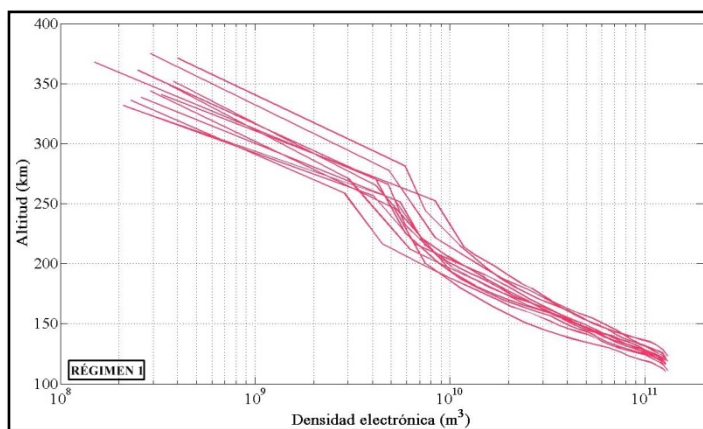


Figura AIV- 1. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 1: perfiles #125 al #141.

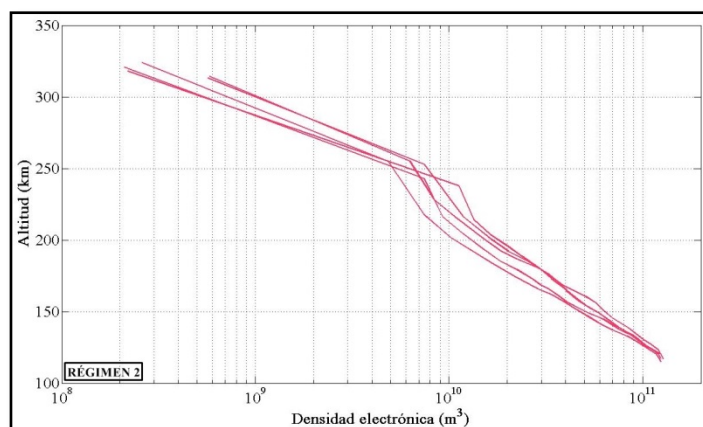


Figura AIV- 2. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 2: perfiles #144 al #152.

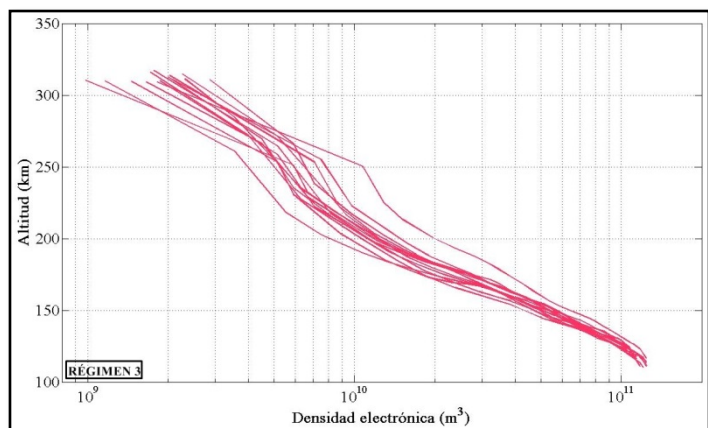


Figura AIV- 3. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 3: perfiles #1563 al #173.

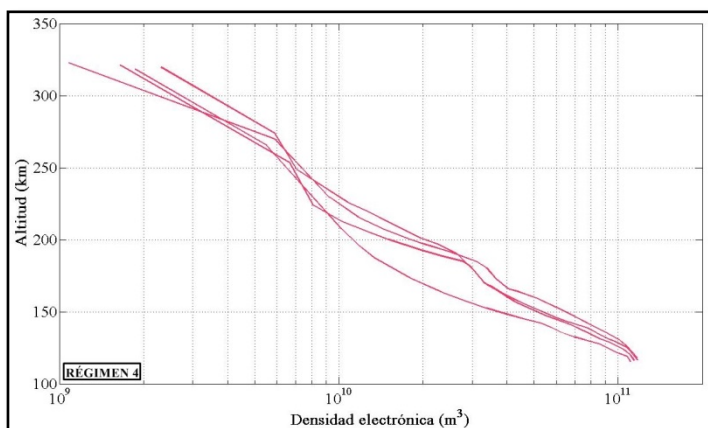


Figura AIV- 4. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 4: perfiles #174 al #177.

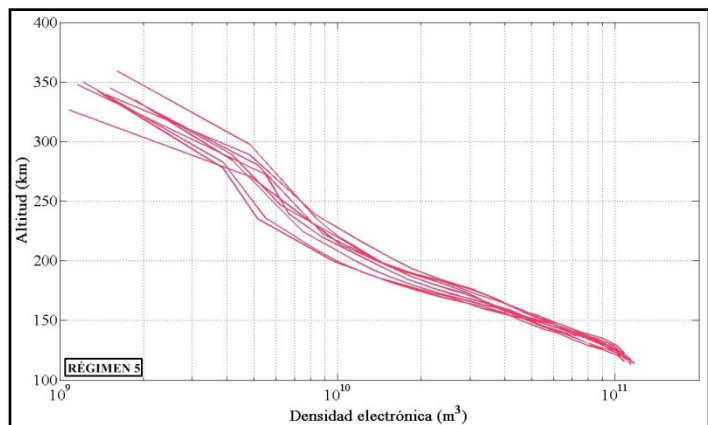


Figura AIV- 5. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 5: perfiles #179 al #192.

ANEXO V. Perfiles densidad electrónica, 9316

Perfiles de densidad electrónica obtenidos para la órbita 9318 a partir de los ionogramas proporcionados por el radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express.

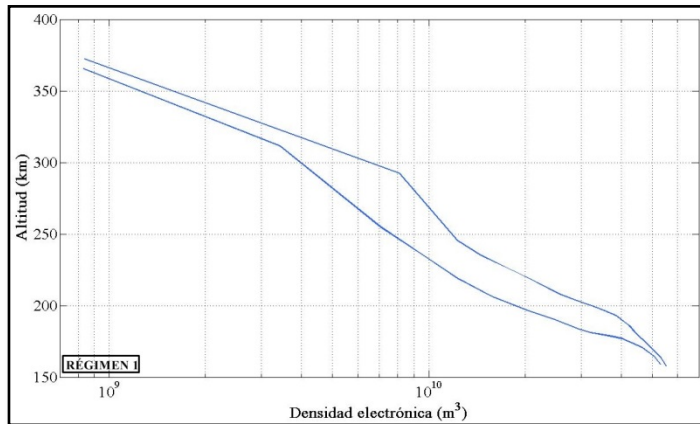


Figura AV- 1. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 1: perfiles #153 al #156.

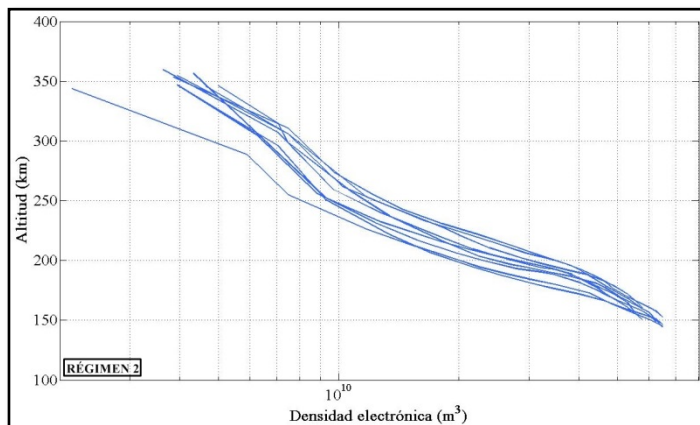


Figura AV- 2. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 2: perfiles #159 al #178.

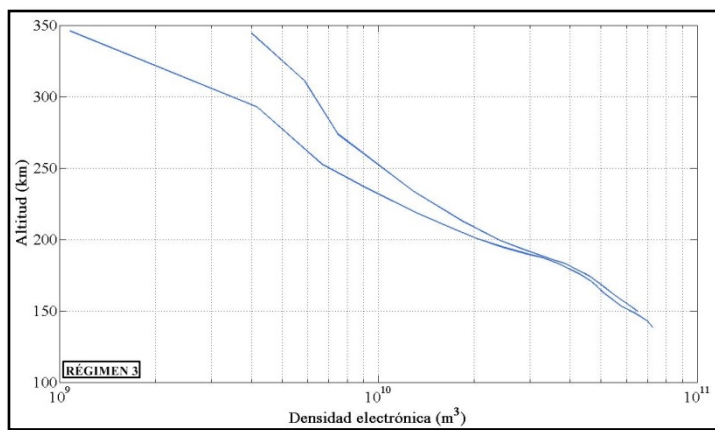


Figura AV- 3. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 3: perfiles #179 al #183.

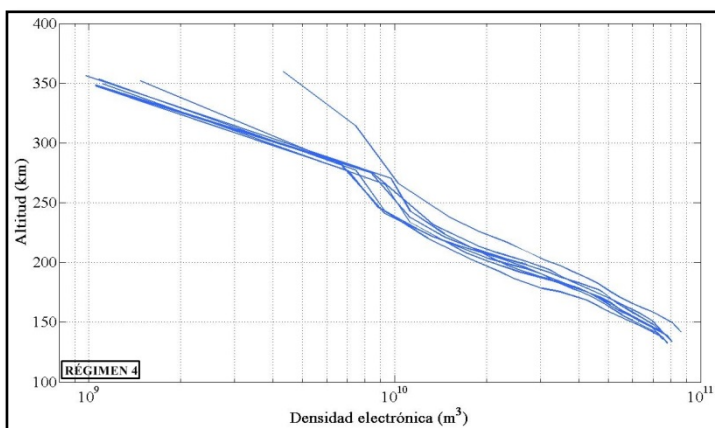


Figura AV- 4. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 4: perfiles #184 al #194.

ANEXO VI. Perfiles densidad electrónica, 6788

Perfiles de densidad electrónica obtenidos para la órbita 6788 a partir de los ionogramas proporcionados por el radar MARSIS a bordo de la misión Mars Express.

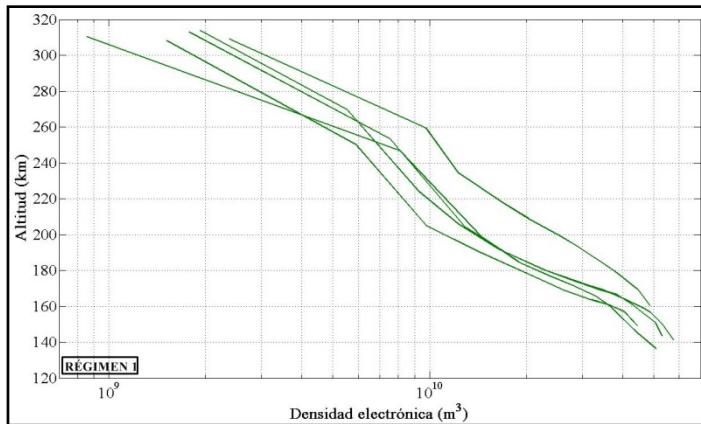


Figura AVI- 1. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 1: perfiles #160 al #170.

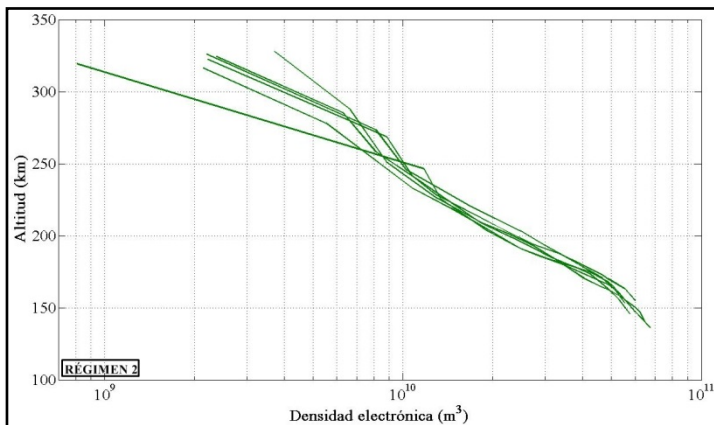


Figura AVI- 2. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 2: perfiles #172 al #179.

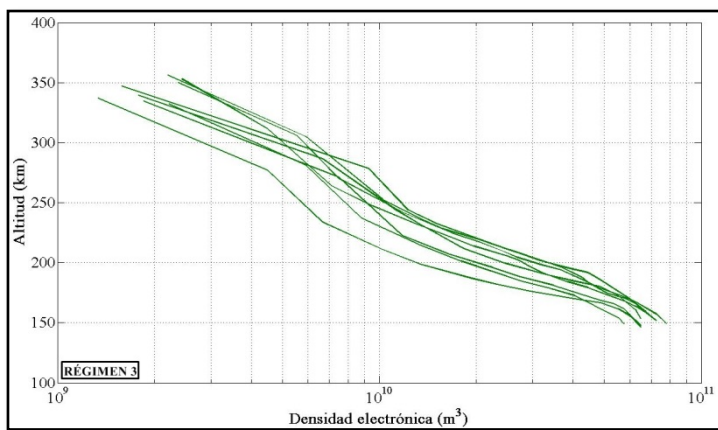


Figura AVI- 3. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 3: perfiles #181 al #190.

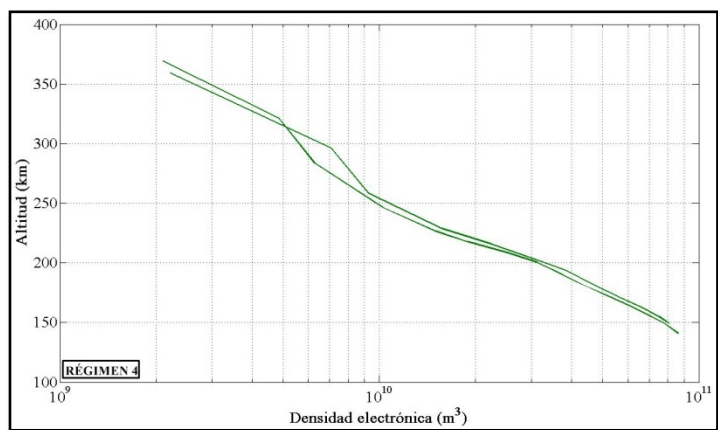


Figura AVI- 4. Perfiles de densidad electrónica. Régimen 4: perfiles #191 al #194.

ANEXO VII. Órbita 3151: Valores calculados

Resumen de los valores característicos , así como los calculados en el Capítulo 6.

Tabla AVII- 1. Valores calculados de campo magnético a la altura de la nave, altura de escala del plasma y altura de transición correspondientes a la órbita 3151.

Perfil	SZA (°)	Lat (°)	Z (km)	B _{MARSIS} (nT)	H (km)	AT (km)
125	43.29	33.10	374.89	49.28	34.13	208.90
126	43.33	32.62	371.33	49.28	27.47	163.15
127	43.37	32.14	367.87	51.04	31.33	166.10
129	43.47	31.17	361.24	50.25	26.89	151.70
132	43.64	29.70	352.01	48.72	31.51	162.50
133	43.71	29.22	349.12	50.25	31.34	160.35
135	43.86	28.24	343.65	48.45	22.93	124.65
136	43.95	27.74	341.07	48.45	35.76	171.65
137	44.03	27.25	338.58	48.45	29.29	172.10
138	44.12	26.76	336.19	50.15	26.91	174.55
140	44.32	25.77	331.71	48.72	27.45	153.20
141	44.42	25.28	329.62	48.72	26.30	133.15
144	44.76	23.79	323.96	49.47	34.27	170.35
146	45.00	22.79	320.70	49.47	36.32	152.50
148	45.27	21.80	317.84	50.25	43.19	166.50
151	45.69	20.30	314.32	45.37	40.03	190.25
152	45.84	19.80	313.36	41.87	40.40	234.70
156	46.48	17.80	310.53	56.10	42.46	165.85
157	46.65	17.30	310.08	49.47	34.67	160.35
159	46.99	16.29	309.49	51.87	41.90	159.80
160	47.17	15.79	309.35	51.87	45.63	147.55
161	47.36	15.29	309.32	51.04	48.06	155.45
164	47.93	13.79	309.84	52.72	45.80	164.60
166	48.33	12.78	310.71	51.87	44.13	164.55
167	48.53	12.28	311.30	50.25	44.93	151.20
168	48.74	11.78	311.99	54.97	47.73	153.05
169	48.95	11.28	312.79	54.97	42.21	150.00
170	49.16	10.78	313.69	59.55	38.88	161.00
171	49.38	10.28	314.70	62.14	41.92	157.70
172	49.59	9.78	315.81	54.14	33.21	159.85
173	49.82	9.28	317.02	55.83	34.16	158.05
174	50.04	8.78	318.33	51.04	30.97	151.55
175	50.27	8.28	319.75	50.15	41.21	152.60
176	50.50	7.78	321.27	50.25	40.91	161.30
177	50.73	7.28	322.89	50.25	47.11	161.65
179	51.20	6.28	326.44	53.33	46.89	173.35
183	52.18	4.30	334.77	53.33	40.82	163.65
184	52.43	3.80	337.10	50.25	42.50	160.50
185	52.68	3.31	339.54	51.04	46.85	154.20

Perfil	SZA (°)	Lat (°)	Z (km)	B _{MARSIS} (nT)	H (km)	AT (km)
186	52.93	2.82	342.08	49.47	43.41	151.95
187	53.19	2.32	344.71	49.47	41.78	152.80
188	53.45	1.83	347.45	48.72	36.68	175.20
189	53.71	1.34	350.28	49.47	38.03	163.40
192	54.50	-0.13	359.37	48.45	42.48	164.05

ANEXO VIII. Órbita 9316: Valores calculados

Resumen de los valores característicos , así como los calculados en el Capítulo 6.

Tabla AVIII- 1. Valores calculados de campo magnético a la altura de la nave, altura de escala del plasma y altura de transición correspondientes a la órbita 9316.

Perfil	SZA (°)	Lat (°)	Z (km)	B _{MARSIS} (nT)	H (km)
153	88.34	21.39	372.51	0	111.53
156	87.73	19.93	365.74	0	52.06
159	87.13	18.46	359.87	0	99.67
161	86.72	17.47	356.46	0	118.34
162	86.52	16.98	354.91	0	90.41
163	86.32	16.49	353.45	0	108.30
169	85.10	13.52	346.90	0	72.79
170	84.90	13.02	346.17	0	93.53
171	84.70	12.53	345.54	0	79.91
172	84.50	12.03	345.01	0	47.38
178	83.30	9.06	344.02	0	64.03
179	83.10	8.56	344.22	0	70.49
183	82.31	6.58	346.04	0	69.17
184	82.12	6.08	346.76	0	61.98
185	81.92	5.59	347.58	0	72.57
186	81.73	5.09	348.50	0	62.80
187	81.53	4.59	349.52	0	66.47
189	81.14	3.61	351.88	0	61.05
190	80.95	3.11	353.21	0	49.00
192	80.57	2.12	356.18	0	61.13
194	80.19	1.14	359.56	0	59.55

ANEXO IX. Órbita 6788: Valores calculados

Resumen de los valores característicos, así como los calculados en el Capítulo 6.

Tabla AIX- 1. Valores calculados de campo magnético a la altura de la nave, altura de escala del plasma y altura de transición correspondientes a la órbita 6788.

Perfil	SZA (°)	Lat (°)	Z (km)	B _{MARSIS} (nT)	H (km)	AT (km)
160	89.65	-66.45	308.01	66.61	34.63	119.43
164	87.79	-68.42	309.20	55.83	101.82	133.15
166	86.86	-69.40	310.40	47.64	69.42	126.28
169	85.93	-70.38	312.01	38.28	56.22	127.67
170	85.00	-71.36	314.03	41.55	52.33	127.10
172	84.08	-72.34	316.45	64.96	87.04	126.04
174	83.15	-73.31	319.27	59.55	103.38	128.38
176	82.23	-74.28	322.49	69.32	100.65	126.17
177	81.77	-74.76	324.25	76.95	101.58	127.14
178	81.31	-75.24	326.11	85.07	100.20	128.41
179	80.85	-75.72	328.07	85.32	68.37	125.68
181	79.93	-76.67	332.29	89.33	66.36	126.27
182	79.47	-77.15	334.54	89.33	72.03	124.04
183	79.02	-77.62	336.90	86.62	50.55	124.06
184	78.56	-78.09	339.35	82.46	192.43	125.58
187	77.20	-79.49	347.29	64.00	94.06	134.50
188	76.74	-79.96	350.13	58.66	87.86	123.57
189	76.29	-80.42	353.07	53.93	70.73	124.95
190	75.84	-80.87	356.10	47.64	80.63	124.62
191	75.39	-81.32	359.22	44.66	60.82	134.50
194	74.04	-82.65	369.17	29.78	65.08	127.22

ANEXO X. Contribuciones científicas

El trabajo y contenido de esta Tesis doctoral ha dado lugar a publicaciones científicas así como a diferentes contribuciones científicas a congresos nacionales e internacionales.

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

Ramírez-Nicolás, M., Usero, D., and Vázquez, L. (2014). Numerical studies of charged particles in a magnetic field: Mars application. *Central European Journal of Physics*, 12(8), 521-531.

Ramírez-Nicolás, M., Usero, D., Velasco, M.P., and Vázquez, L. Numerical study of a charged particle in a general magnetic field, *International Journal of Pure and Applied Mathematics* (enviado), 2015a.

Ramírez-Nicolás, M., Sánchez-Cano, B., Witasse, O., Blelly, P.-L., and Lester, M. The effect of the induced magnetic field on the electron density vertical profile of the Mars' ionosphere: a Mars Express MARSIS radar data analysis and interpretation, *Planet Space Sci* (enviado), 2015b.

Ramírez-Nicolás, M., Herraiz, M., and Vázquez, L. Electric field analysis from a numerical scheme on Mars, (en preparación).

CONGRESOS INTERNACIONALES

Presentación: Póster

Autores: Vázquez, L., **Ramírez-Nicolás, M.**, Caro-Carretero, R., Aguirre, C., Sánchez-Cano, B., Vilela, R., Jiménez, S.

Título: New approaches for the analysis of geomagnetic data.

Congreso: The Fifth Moscow Solar System Symposium.

Lugar: 13-18 de octubre de 2014, Space Research Institute, Moscú, Rusia.

Presentación: Póster

Autores: Díaz-Michelena, M., Cerdán, M.F., **Ramírez-Nicolás, M.**, Sánchez-Cano, B., Sánchez-Bayton, M., Kilian, R.

Título: Terrestrial Analogues models base on MOURA magnetometer data. Application to Gusev cráter and Apollinaris volcano.

Congreso: European Geoscience Union (EGU).

Lugar: 27 abril – 2 mayo de 2014, Viena, Austria.

Presentación: Póster

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Sánchez-Cano, B., Sánchez-Bayton, M., Vázquez, L., Usero, D., Herraiz, M.

Título: Geophysical martian studies developed at the Universidad Complutense de Madrid: electric and Magnetic fields.

Congreso: Planet Mars IV Workshop,

Lugar: 20-25 de octubre de 2013, Les Houches, Francia.

Presentación: Póster

Autores: Sánchez-Cano, B., Vázquez, L., **Ramírez-Nicolás, M.**, Sánchez-Bayton, M., Usero, D., Herraiz, M.

Título: Geophysical martian studies developed at the Universidad Complutense de Madrid: ionosphere and volcanism.

Congreso: Planet Mars IV Workshop.

Lugar: 20-25 de octubre de 2013, Les Houches, Francia.

Presentación: Póster

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Usero, D., and Vázquez, L.

Título: An approximation to the behaviour of electrical charged particles near surface in local martian magnetic fields

Nombre del congreso: MPSE

Lugar: 05/06/2012, Budapest, Hungría.

Presentación: Comunicación Oral

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Usero, D., and Vázquez, L.

Título: An approximation to the behaviour of electrical charged particles near the surface, in the local martian magnetic fields

Nombre del congreso: Muan meeting

Lugar: 09/05/2012, Uppsala, Suecia

Presentación: Póster

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Usero, D., Vázquez, L., y Herraiz, M.

Título: Charged particles close to the Mars surface

Nombre del congreso: EPSC-DPS Joint Meeting 2011

Lugar: 02/10/2011, Nantes, Francia.

Presentación: Póster

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Vázquez, L., Usero, D., and Herraiz, M.

Título: Charged Particles in the Crustal Magnetic Field of Mars

Nombre del congreso: European Geosciences Union, 2011 General Assembly,

Lugar: 03/04/2011, Viena, Austria.

CONGRESOS NACIONALES

Presentación: Comunicación Oral

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Sánchez-Cano, B., Herraiz, M., Vázquez, L., y Usero, D.

Título: Entorno magnético en la Universidad Complutense de Madrid

Nombre del congreso: Reunión Coordinación Meiga MetNet

Lugar: 25/02/2014, Madrid, España

Presentación: Póster

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Sánchez-Cano, B., y Herraiz, M.

Título: Medida de B en Marte a partir de ionogramas

Nombre del congreso: III Encuentro Sobre Ciencias Planetarias y Exploración del Sistema Solar

Lugar: 19-21 junio 2013, Madrid, España

Presentación: Póster

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Usero, D., y Vázquez, L.

Título: Aproximación al movimiento de las partículas cargadas en campos magnéticos locales en Marte.

Nombre del congreso: III Encuentro Sobre Ciencias Planetarias y exploración del Sistema Solar

Lugar: 19-21 junio 2013, Madrid, España.

Presentación: Comunicación Oral

Autores: Sánchez-Cano, B., **Ramírez-Nicolás, M.**, Herraiz, M., Vázquez, L., and Usero, D.

Título: Entorno magnético en la Universidad Complutense de Madrid

Nombre del congreso: Reunión Coordinación Meiga MetNet

Lugar: 2012, Madrid, España

Presentación: Comunicación Oral

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Usero, D., y Vázquez, L.

Título: Charged particles behaviour with real data on Mars

Nombre del congreso: EPSC

Lugar: 23/09/2012 Madrid, España.

Presentación: Comunicación Oral

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Usero, D., Vázquez, L., y Herraiz, M.

Título: Charged Particles in the crustal magnetic field of Mars

Nombre del congreso: Magnetometer Workshop

Lugar: 18/07/2011, Sigüenza, España.

CONFERENCIAS INTERNACIONALES INVITADAS

Autores: **Ramírez-Nicolás, M.**, Usero, D., Vázquez, L., y Herraiz, M.

Título: Charged particles close to the Mars surface

Lugar: 2012, Finlancia, Helsinki.

GRUPOS DE INVESTIGACIÓN

Título: Participación Científica en la Misión a Marte MEIGA-METNET PRECURSOR

Fecha: 01/01/2010-31/12/2011

Entidad financiadora: Ministerio de Economía y Competitividad

Referencia: AYA2009-14212-C05-05

Título: Participación Científica en la Misión a Marte MEIGA-METNET PRECURSOR

Fecha: 01/01/2012-31/12/2014

Entidad financiadora: Ministerio de Economía y Competitividad

Referencia: AYA2011-29967-C05-02

Título: Prórroga: Participación Científica en la Misión a Marte MEIGA-METNET PRECURSOR

Fecha: 01/01/2015-30/09/2015

Entidad financiadora: Ministerio de Economía y Competitividad

Referencia: AYA2011-29967-C05-02

Título: Miembro del Instituto de Geociencias (IGEO) (CSIC-UCM) desde 2011.

Título: Miembro del Instituto de Matemáticas Interdisciplinar (IMI) de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) desde 2010.

ESTANCIAS EN CENTROS DE INVESTIGACIÓN

Lugar: Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS), Paris, Francia.

Fecha: 18 junio-18 octubre 2013

Lugar: Finnish Meteorological Institute (FMI), Helsinki, Finlandia.

Fecha: 15 febrero-17 mayo 2012

Lugar: European Space Research and Technology Centre (ESTEC), Noordwijk, Holanda.

Fechas: 20-24 octubre 2014

Lugar: European Space Research and Technology Centre (ESTEC), Noordwijk, Holanda.

Fechas: 6-10 octubre 2014

PARTICIPACIÓN EN CURSOS CIENTÍFICOS

Conferencia Técnica sobre la Meteorología Espacial III, 26 de noviembre de 2013 en la Escuela de Protección Civil, Rivas Vaciamadrid, Madrid, España.

Workshop: Planet Mars IV en École de Physique des Houches, Les Houches, Francia, 20-25 de octubre de 2013. Organizado por la Agencia Espacial Europea (ESA).

Conferencia Técnica sobre el Clima Espacial II, 29 de mayo de 2012 en la Escuela de Protección Civil, Rivas Vaciamadrid, Madrid, España.

Workshop: SPICE European Training Workshop 2012 en ESAC/ESA Madrid, España, 16-19 de abril de 2012. Impartido por el equipo NAIF (NASA-JPL) en las instalaciones de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Workshop: 4th Magnetometer Workshop, 18-22 de julio de 2011 organizado por el Institut für Geophysik und Extraterrestrische Physik (IGEP) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) en Sigüenza, España.

Escuela de Verano UCM-El Escorial: “Marte y Sociedad”, 13-15 de julio de 2011, Madrid, España.

Workshop: International Advanced School on Space Weather Modelling and Applications, 18-29 de octubre de 2010 en el Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italia.

Escuela de Verano UCM-El Escorial: “Marte y sus enigmas”, 12-16 de julio de 2010, Madrid, España.

Workshop: “Modelos matemáticos y fenómenos no lineales”, impartido por Jorge Alberto González del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas el 12, 14, 19 y 21 de enero de 2010, Madrid, España.

EXPERIENCIA ACADÉMICA

Colaboración en las tareas docentes

Análisis Numérico, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, 25 horas, curso académico 2014-2015.

Colaboración en las tareas docentes

Laboratorio de Computación Científica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 30 horas, curso académico 2013-2014.

Colaboración en las tareas docentes

Laboratorio de Computación Científica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 30 horas, curso académico 2012-2013.

Colaboración en las tareas docentes

Laboratorio de Computación Científica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 45 horas, curso académico 2011-2012.

Este trabajo se centra en el estudio sobre los campos eléctricos y magnéticos detectados en Marte según diferentes enfoques..

El primer estudio está relacionado con el estudio de las trayectorias de las partículas cargadas eléctricamente cuando se encuentran bajo la acción de diferentes configuraciones de campo magnético. Se ha generado un esquema numérico en coordenadas cartesianas capaz de reproducir dichas trayectorias. Así mismo se ha realizado un estudio detallado del momento angular de dichas partículas desde un punto de vista discreto y continuo.

La segunda parte de esta Tesis Doctoral se centra en la interacción entre el viento solar y la ionosfera marciana a partir de los datos proporcionados por la misión Mars Express. A partir de los mismos se ha establecido la influencia del campo magnético inducido sobre la ionosfera marciana. Además, teniendo en cuenta el balance de presiones además de confirmar la compresión de la ionosfera se han obtenido valores para la temperatura de los iones en la ionosfera.

Por último, se ha presentado un nuevo método para estimar los valores de campo eléctrico en Marte generados en el interior de un dust devil debido a la interacción entre las partículas de polvo que intervienen en el mismo.

Dirijida por:
Dr. Luis Vázquez Martínez
Dr. Miguel Herraiz Sarachaga